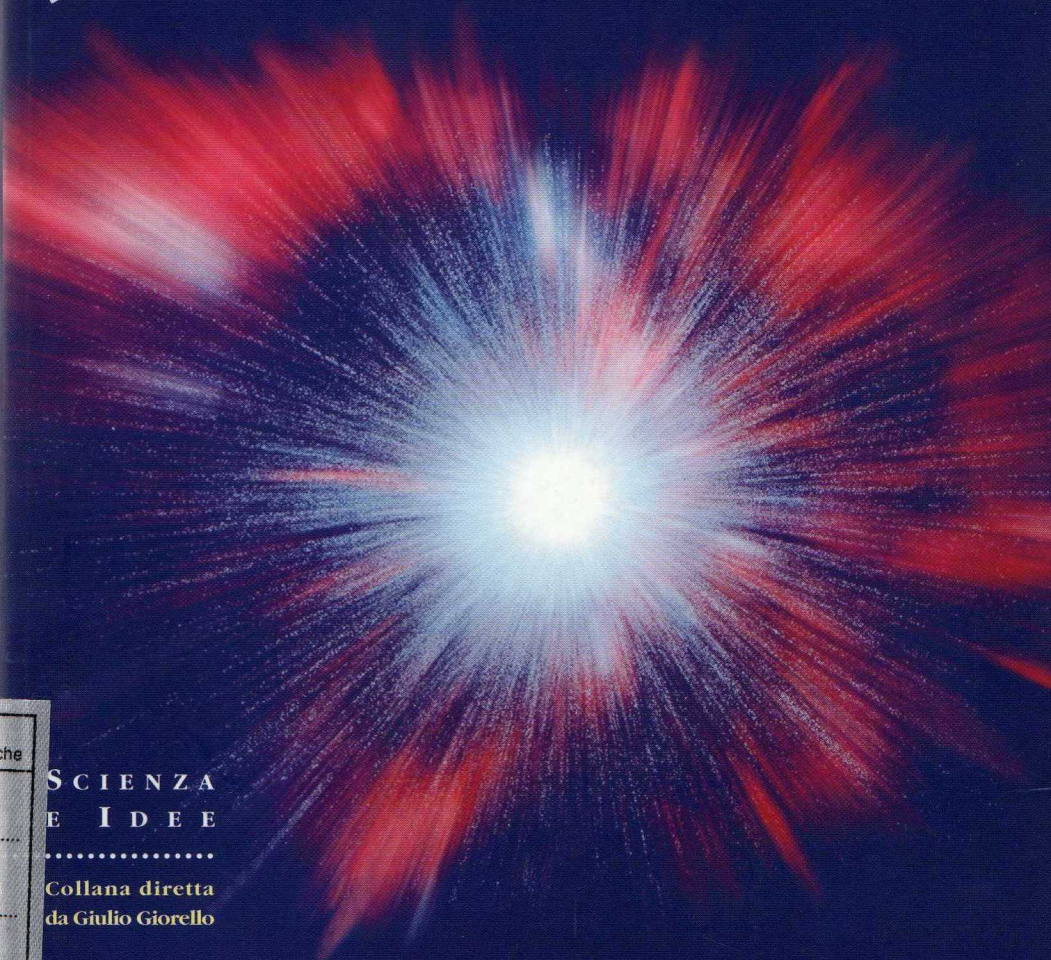
Martin Rees

Prima dell'inizio

Il nostro universo e gli altri

Prefazione di Stephen Hawking

SCIENZA E IDEE

Collana diretta da Giulio Giorello

Martin Rees

Prima dell'inizio

Il nostro universo
e gli altri

www.raffaellocortina.it

Titolo originale
Before the Beginning

Traduzione di
Pier Daniele Napolitani

ISBN 88-7078-508-4

Milano, via Rossini 4

Prima edizione: 1998

INDICE

Il traduttore desidera ringraziare l'amico Paolo Farinella del gruppo di Meccanica celeste del dipartimento di Matematica di Pisa per i molti suggerimenti di traduzione, nonché per aver cortesemente voluto leggere il manoscritto. Desidera anche esprimere gratitudine a Matteo Piccioli e Giulio Pisani per la cortesia e la pazienza con cui gli hanno messo a disposizione le risorse della loro libreria "Pangloss" di Pisa.

PREFAZIONE

Io e Martin Rees siamo stati studenti ricercatori a Cambridge insieme. Venivamo però da esperienze e studi diversi: lui aveva fatto matematica e si stava indirizzando verso la fisica e l'astrofisica; mentre io che, teoricamente, la fisica avrei dovuto averla già imparata a Oxford, stavo cercando di apprendere la matematica che mi serviva per capire la teoria della relatività generale di Einstein. Il supervisore delle nostre ricerche era Dennis Sciama. La sua influenza era molto stimolante, anche se né Martin né io condividevamo tutte le sue idee. In quei giorni era in corso una gran discussione fra i sostenitori della teoria per cui l'universo sarebbe cominciato con un *big bang* e quelli invece che difendevano la teoria (nata proprio a Cambridge) che voleva che l'universo fosse esistito da sempre in uno stato stazionario. Sciama era fra questi ultimi, ma Martin e io eravamo molto colpiti dalle prove che le osservazioni stavano cominciando a fornire a favore del Big Bang: i conteggi delle radiosorgenti e la scoperta dei *quasar*. La controversia ebbe termine, alla fine, con la scoperta di una debole radiazione di fondo, che solo il Big Bang avrebbe potuto lasciare dietro di sé.

Per uno studente di questa materia era un'epoca eccitante. Sia in campo osservativo che sul piano teorico venivano compiute scoperte stupefacenti. Tutto era nuovo. E uno studente poteva cogliere possibilità che tendevano invece a sfuggire a ricercatori che si erano ormai fatti una posizione e che non avevano l'agilità mentale per adeguarsi alle novità. La cosa

notevolissima è che, salvo che per un paio di su e giù, la situazione sia rimasta la stessa. È questo un settore che si sviluppa oggi con altrettanta rapidità di allora. Ma Martin e io, da allora, abbiamo imboccato strade alquanto diverse. Io mi sono dedicato, soprattutto, a sviluppare la teoria e gran parte del mio lavoro non è ancora stato confermato dall'osservazione. Martin, invece, ha sempre lavorato in stretto contatto con le osservazioni e con ciò che esse ci possono raccontare sulla natura dell'universo. Credo che questa differenza di approccio si rifletta anche nei libri che abbiamo scritto. Questo volume fa toccare al lettore la vera stoffa di cui è intessuta l'astronomia – praticamente senza mai menzionare Dio, parola che sembra mettere Martin particolarmente a disagio. In fin dei conti, è un concetto teorico.

Maggio 1997 *Stephen Hawking*

RINGRAZIAMENTI

Questo libro presenta una concezione personale della cosmologia: come percepiamo il nostro universo, quali sono gli attuali dibattiti in materia e la portata e i limiti delle nostre future conoscenze. Non sarebbe stato mai terminato, e certo non con lo stile che ha, senza il continuo stimolo che Nick Webb della Simon & Schuster (UK) mi ha fornito. I suoi consigli sul piano redazionale hanno avuto per me enorme valore: è stato lui, fra l'altro, a insistere perché mi avventurassi un po' nel terreno delle speculazioni e aggiungessi argomenti piuttosto controversi che altrimenti avrei lasciato da parte. Il volume si rivolge a quel genere di lettori che condividono il contagioso entusiasmo di Nick Webb per capire come si produce la scienza e quali siano i problemi che i cosmologi si trovano ad affrontare. Sono anche profondamente grato a Jeff Robbins e ai suoi colleghi della redazione della Addison-Wesley, come sento di dover ringraziare Catherine Reed e Ingrid Connell per l'aiuto redazionale che mi hanno fornito.

INTRODUZIONE

> La filosofia comincia con la meraviglia. E alla fine, quando il pensiero filosofico ha dato il meglio di sé, la meraviglia resta.
>
> ALFRED NORTH WHITEHEAD

La prospettiva cosmica

Il nostro universo è sbocciato da un evento iniziale, il Big Bang, la "Palla di Fuoco". Si è espanso e raffreddato; migliaia di milioni di anni dopo le stelle e le galassie hanno intessuto le complicate figure che vediamo intorno a noi; e almeno intorno a una stella, almeno su un pianeta, gli atomi si sono disposti in modo da formare creature abbastanza complesse da essere capaci di meditare sulla loro evoluzione.

I cinici usavano dire – non del tutto a torto – che in cosmologia ci sono solo due fatti: il nostro universo si espande; e il cielo è scuro, di notte. Ma non è più così. I telescopi, al suolo e nello spazio, hanno esaminato galassie così lontane che la loro luce ci arriva da un'epoca in cui l'universo aveva appena un decimo dell'età che ha ora. I calcolatori possono simulare il modo con cui le galassie sono emerse dai loro amorfi inizi. Altre tecniche ci hanno rivelato "relitti" di ere della storia cosmica persino più antiche.

Possiamo risalire nell'evoluzione dell'universo fino al suo primo secondo di vita. Un'affermazione, questa, che avrebbe stupefatto le precedenti generazioni dei cosmologi, che con-

cepivano il loro oggetto di studio come un esercizio matematico, remoto dalla possibilità di controlli empirici. Io, personalmente, sarei disposto a scommettere dieci contro uno che il Big Bang c'è stato per davvero; che ogni cosa che esiste nell'universo che possiamo osservare è cominciata in una Palla di Fuoco estremamente compressa, assai più calda del centro del Sole. La maggior parte dei cosmologi accetterebbero scommesse altrettanto forti. (Anche se credo ci sia ancora una minoranza che non sarebbe tanto d'accordo.)

Il Cosmo e il Micromondo

Per colossali che siano, le stelle e le galassie si collocano piuttosto in basso sulla scala della complessità. È per questo che non è presunzione smodata aspirare a comprenderle. Un rospo ci lancia una sfida scientifica molto più difficile di quella di una stella.

I sistemi planetari sono comuni intorno alle altre stelle. Ma, dato un ambiente propizio, che probabilità c'è che la vita cominci e si evolva fino a uno stadio "interessante"? Questo problema biologico è tuttora aperto. Il cosmo potrebbe brulicare di vita. D'altro canto, l'evoluzione organica potrebbe richiedere una combinazione di accidenti così rara, che solo la nostra Terra potrebbe ospitare esseri consapevolmente intelligenti.

Il nostro ciclo cosmico potrebbe essere finito, destinato a terminare in un collasso universale, in un Big Crunch, nella Grande Strizzata. Ma ciò non avverrà prima che tutte le stelle si siano spente, prima che tutti gli atomi e persino i buchi neri siano stati riciclati in radiazione. Anche se la vita e l'intelligenza fossero attualmente presenti solo sulla Terra, avrebbero il tempo di diffondersi in tutta la Galassia e oltre. Se in questo momento la vita sulla Terra venisse spazzata via, le potenzialità dell'intero universo ne sarebbero diminuite. La nostra biosfera potrebbe avere un senso universale, non meramente terrestre.

Possiamo risalire in modo affidabile nella storia cosmica fino al suo primo secondo. Il terreno diventa più infido quando estrapoliamo ancora più indietro, fino al primo millisecondo. Ma i progressi recenti permettono di far diventare oggetto di seria ricerca problemi che fino a poco tempo fa erano considerati puramente speculativi: "Perché l'universo è tanto grande?", "Perché si espande?"

La sfida che attende il prossimo Newton o Einstein è quella di riuscire a "unificare" le forze della natura: a interpretare le interazioni elettriche, nucleari e gravitazionali come manifestazioni differenti di un'unica forza originaria e primeva. Questa unificazione potrebbe manifestarsi (ed essere sottoposta a prova) solo quando le energie siano enormemente elevate; forse soltanto negli istanti iniziali del Big Bang, quando tutto ciò che oggi gli astronomi possono vedere era compresso in un volume più piccolo di una palla da golf e onde quantistiche facevano tremare l'intera fabbrica dello spazio. I "semi" delle galassie e delle altre strutture cosmiche e l'eterea "materia oscura" che pervade il nostro universo sono residui di quell'era primordiale.

Il Multiverso

Via via che il nostro universo si è raffreddato, la sua particolare mistura di energia e radiazione, e forse persino il numero di dimensioni del suo spazio, potrebbero essere emersi accidentalmente, un po' come le figure che il ghiaccio forma in un lago gelato. Le leggi fisiche stesse erano "impostate" nel Big Bang.

Il nostro universo, e le leggi che lo governano, doveva avere caratteristiche piuttosto speciali (in un senso ben definito) perché potessimo venire fuori noi esseri umani. Si dovevano formare le stelle; le fornaci nucleari che le fanno ardere nel cielo dovevano trasmutare l'idrogeno primordiale in atomi di carbonio, ossigeno e ferro; un ambiente stabile e vaste esten-

sioni di spazio e di tempo erano prerequisiti per le complessità della vita terrestre.

L'evidente "sintonizzazione fine" da cui dipende la nostra esistenza potrebbe essere solo una coincidenza: un tempo la pensavo così. Ma oggi questa sembra una concezione troppo ristretta. Ciò che convenzionalmente chiamiamo "l'Universo", potrebbe essere solo un elemento di un insieme. Ne potrebbero esistere innumerevoli altri, dotati di leggi diverse. L'universo in cui noi siamo venuti alla luce appartiene a un sottoinsieme non comune, quello in cui le leggi fisiche permettono alla complessità e alla coscienza di potersi sviluppare. Se si accetta quest'idea, varie caratteristiche apparentemente "speciali" del nostro universo – quelle che i teologi usavano produrre come prova dell'esistenza della Provvidenza o di un Progetto – non suscitano più sorpresa. Questa linea di pensiero – la prospettiva cioè del "Multiverso" – fornisce uno dei motivi che percorrono questo libro.

Questo nuovo concetto rappresenta, potenzialmente, un allargamento della nostra prospettiva cosmica. Un allargamento altrettanto drastico del passaggio dalle idee precopernicane al concepire la Terra come un pianeta, in orbita intorno a una stella piuttosto tipica situata ai margini della Via Lattea, la quale peraltro non è che una galassia come tantissime altre.

I cosmologi ora sono in grado di affrontare, con uno spirito genuinamente scientifico, tutta una nuova gamma di problemi su cui prima potevano solo speculare abbandonando la loro veste professionale.

Il nostro universo intero potrebbe essere solo un elemento – quasi un "atomo" – di un insieme infinito. Di un arcipelago cosmico. Ciascuno di questi universi avrebbe inizio col suo big bang, acquisirebbe una sua impronta distintiva (e le sue proprie leggi fisiche) nel corso del raffreddamento e traccerebbe il suo ciclo cosmico. Il Big Bang da cui il nostro universo ebbe inizio è, in questa prospettiva allargata, una parte infinitesima di un'elaborata struttura che si estende ben al di là della portata di qualsiasi telescopio.

Alcuni cosmologi speculano che gli "embrioni" dei nuovi universi potrebbero formarsi all'interno di quelli esistenti. L'implosione che porta a raggiungere densità colossali (come quelle, per esempio, presenti intorno a un piccolo buco nero) può far scatenare l'espansione di un nuovo dominio dello spazio per noi inaccessibile. Si potrebbe persino pensare di "fabbricare" degli universi – sfida sperimentale assai al di là delle attuali risorse umane, ma che potrebbe diventare percorribile, specie se pensiamo che il nostro universo ha ancora davanti a sé quasi tutta la sua strada. Con questo universo-figlio non si potrebbe scambiare alcuna comunicazione, ma esso potrebbe portare i segni della sua genitura. Il nostro universo stesso potrebbe essere il risultato (pianificato o meno) di un evento di questo genere avvenuto in un cosmo precedente. Il tradizionale "argomento del progetto", caro ai teologi, si ripresenta in nuove vesti.

La maggior parte degli universi creati naturalmente sarebbero una specie di "nati morti", nel senso che non offrirebbero un ambiente propizio per un'evoluzione complessa: vivrebbero per troppo poco tempo, o avrebbero un numero sbagliato di dimensioni, o non permetterebbero la chimica, o sarebbero combinati male in qualche altro modo. Ma il nostro potrebbe anche non essere il più complesso di tutti. Nell'insieme degli universi potrebbero essercene altri dotati di una struttura più ricca, al di là di quello che possiamo immaginare.

Questo libro

Non possiamo afferrare la natura del nostro ambiente cosmico solo per mezzo del puro pensiero. Sono stati i telescopi moderni e l'astronautica – esplorando profondità dello spazio e tempi sempre più remoti, ricercando oggetti bizzarri come i buchi neri o le stringhe cosmiche – che hanno fatto della cosmologia una scienza. Questo libro descrive alcuni punti alti di questa ricerca, sottolineando le scoperte e le idee che solo

ora stanno venendo al centro dell'attenzione. Ho però cercato di disegnare il contesto storico e di chiarire alcuni "vecchi" problemi che perennemente ricompaiono nella discussione: la natura dello spostamento verso il rosso, la materia oscura, la gravità e così via.

Ho disseminato nel testo le mie impressioni e i miei ricordi di alcune notevoli figure di scienziati in cui mi sono imbattuto o con cui ho lavorato, parlando di come il loro approccio sia stato modellato dal loro stile personale, dai loro atteggiamenti extrascientifici e, in certi casi, dalle loro ossessioni.

Si legga questa definizione tratta dal *Nuovo Zingarelli*:

> Penna *s.f.* Formazione cornea della pelle caratteristica degli uccelli, costituita da un asse centrale la cui parte basale (*calamo*) è inserita nella pelle, mentre la parte rimanente (*rachide*) porta il *vessillo* formato da tante appendici laterali sfrangiate.*

Suppongo possa risultare molto utile a una persona dotata di immenso sapere che non abbia mai visto un uccello. Alcuni libri sulla scienza sembrano indirizzarsi a una classe (praticamente vuota) di lettori di questo tipo: quelli con un enorme vocabolario che però rimangono confusi di fronte ai numeri o alle equazioni. Il gergo può essere anche più impenetrabile di semplici formule.

Qui ho cercato di evitare e gergo e formule. Ma i numeri non si possono mettere da parte. E descrivendo il cosmo è inevitabile che alcuni di essi siano molto grandi. Ciò che importa è solo il loro ordine di grandezza, non il valore esatto, e

* Rees cita naturalmente da un vocabolario inglese, il *Merriam Webster's Collegiate Dictionary*: "Ciascuna delle leggere escrescenze cornee che formano il tegumento del corpo degli uccelli e che consiste di un rachide che porta su ogni lato una serie di filamenti laterali o barbe che a loro volta portano barbule, le quali a loro volta portano delle barbicelle che comunemente terminano in amuli uncinati e intrecciati con le barbule delle barbe adiacenti in modo da collegare le barbe in un solo vessillo continuo." Non so se sia il caso di scusarmi con i lettori italiani per la maggiore semplicità della definizione riportata nel testo. [NdT]

dunque vengono presentati sotto forma di potenze di dieci (10^x, ove x denota il numero di zeri che comparirebbe nel numero scritto per esteso).

Niels Bohr, che fu un grande pioniere della fisica del Novecento, consigliava ai suoi colleghi di "parlare altrettanto chiaramente di quanto pensate, ma non più di così". Non c'è dubbio che lui seguisse il suo stesso consiglio – in effetti era famoso per borbottare in modo inudibile e incomprensibile. La matematica usata dai fisici teorici e gli strumenti utilizzati dagli osservatori possono effettivamente sembrare alquanto astrusi. Ma questi *tecnicismi* riguardano solo gli specialisti: non sono altro che mezzi per affrontare i grandi problemi della cosmologia: "Come sono nate le stelle, i pianeti e la vita?" "Perché il nostro universo è quello che è?" "Che cosa ha dato l'impronta alle leggi che lo governano?" "Potrebbero esistere altri universi?" Chiunque può meditare su questi problemi, anzi, in campi dove tutti noi procediamo a tentoni, lo specialista ha meno vantaggi rispetto al comune curioso.

Alcune asserzioni sul nostro universo sono sostenute da prove ben salde e dispongono di un vasto consenso fra i cosmologi, altre sono molto azzardate e speculative. Ho cercato di non mescolare i generi. Questo libro descrive alcune idee che fanno parte del consenso corrente, insieme a congetture che vari miei colleghi non condividerebbero. Ho tentato però di mantenere la distinzione fra ciò che è ben stabilito e ciò che non lo è – o, almeno, non lo è *ancora*.

Il mio amico e collega di Cambridge, Stephen Hawking, diceva nel suo *Dal Big Bang ai buchi neri* che ogni equazione avrebbe fatto dimezzare le vendite del libro. Ha seguito quest'ingiunzione, e così ho fatto anch'io. Ma Stephen (o forse il suo editore) pensava anche che ogni menzione di Dio avrebbe raddoppiato le vendite. Con adulante imitazione, Dio è così finito sulle copertine di vari libri successivi (*La particella Dio*, *La mente di Dio* e simili). Su questo non ho intenzione di seguire Stephen. Le incursioni degli scienziati in campi come la teologia o la filosofia possono essere tremendamente ingenue o dogmatiche. Le implicazioni che la cosmologia può avere in

questi campi potranno anche essere assai profonde, ma un senso di diffidenza mi impedisce di avventurarmici.

Mi trovo invece d'accordo con un altro mio collega, il cosmologo Joseph Silk: "La vera filosofia che la fisica moderna può offrire è l'umiltà di fronte alle grandi incognite che sono pur sempre davanti a noi".

Cambridge, 1996 *Martin Rees*

1

DAGLI ATOMI ALLA VITA: ECOLOGIA GALATTICA

> Sono parte del sole come il mio occhio è parte di me. Che io sia parte della terra, il mio piede lo sa, lo sa bene. E il mio sangue è parte del mare.
>
> D.H. LAWRENCE

"Mentre il nostro pianeta ha continuato a girare secondo l'immutabile legge della gravità, da un così semplice inizio innumerevoli forme, bellissime e meravigliose, si sono evolute e continuano a evolversi." Con queste parole si chiude *L'origine delle specie* di Charles Darwin.*

I cosmologi risalgono a *prima* dei "semplicissimi inizi" di Darwin e puntano a collocare il nostro sistema solare in un grande schema evolutivo, che si spinga fino alla nascita della Via Lattea – persino fino al Big Bang da cui avrebbe avuto origine l'espansione del nostro universo. Siamo così incoraggiati a chiederci quali siano le potenzialità dell'evoluzione cosmica nel futuro. Possono esistere altri universi, governati forse da leggi diverse? E se fosse così offrirebbero ambienti altrettanto propizi perché si possano evolvere "forme meravigliose"? A questi temi dedicheremo più avanti interi capitoli.

La luce del Sole impiega otto minuti per arrivare fino alla Terra, e solo poche ore per oltrepassare Nettuno e Plutone, i

* Citiamo dalla traduzione italiana pubblicata da Einaudi nel 1959. [NdT]

pianeti più esterni del nostro sistema solare. La luce di brillanti stelle della Via Lattea – altrettanti soli come il nostro – ha impiegato secoli per arrivare fino a noi. Ma persino la Via Lattea tutta intera, la galassia di stelle cui appartiene il nostro Sole, non è altro che una immagine in primo piano nello scenario cosmico. Il nostro orizzonte si estende ora fino a oggetti così lontani che la loro luce è scaturita vari miliardi (migliaia di milioni) di anni fa.

Anche se non sapessimo nulla delle vaste scale *spaziali* che ci rivelano gli attuali telescopi, basterebbe il nostro sistema solare a tendere [*stretch*] la nostra concezione di scale *temporali* fino a un punto che rende difficile collegarle a prospettive umane, o persino storiche. Si immagini che l'America sia esistita da sempre, e che voi la stiate attraversando a piedi. Siete partiti dalla sua costa orientale quando la Terra si formò, e arriverete in California quando il Sole sarà ormai sul punto di morire. Per compiere questo viaggio dovreste fare *un passo ogni duemila anni*. Tutta la storia che conosciamo sarebbe compresa nell'arco di tre o quattro passi. Per di più, quei passi li avreste fatti subito prima di arrivare a metà strada – da qualche parte nel Kansas, forse. Non sarebbero in nessun modo il culmine del viaggio. Il nostro Sole non è ancora arrivato a metà della sua vita, siamo ancora vicini a quei "semplicissimi inizi" della storia evolutiva.

Il Sole e il suo metabolismo

Il Sole e le altre stelle sono globi giganteschi fatti di gas incandescenti. Al loro interno due forze gareggiano una contro l'altra: la gravità e la pressione. La gravità cerca di spingere tutto verso il centro; ma quando il gas viene compresso si riscalda, e la pressione che ne deriva compensa la gravità. La superficie del Sole brilla al calor bianco, a una temperatura di 6000 gradi circa. Ma perché ci sia una pressione sufficiente il suo interno deve essere ancora più caldo: circa 15 milioni di gradi.

Che cos'è che fa brillare il Sole? Se non ci fosse una fonte di combustibile, la gravità lo farebbe gradualmente sgonfiare, via via che il suo calore se ne andasse via. Il grande fisico dell'Ottocento, Lord Kelvin, calcolò che il Sole si sarebbe ridotto a metà delle sue attuali dimensioni nell'arco di una decina di milioni di anni. Il che è un bel po' di tempo, ma non abbastanza: è ben più corto del tempo richiesto dall'evoluzione biologica e dalle stime correnti della durata della vita della Terra basate sullo studio degli strati geologici e dell'erosione. Kelvin si rendeva conto che la vita del Sole avrebbe potuto essere prolungata solo se ci fosse stata "una qualche fonte sconosciuta di energia nel magazzino della creazione". Che nel problema dovesse entrare in gioco una qualche specie di energia "subatomica" divenne chiaro nel corso degli anni Venti del nostro secolo: la famosa equazione di Einstein $E = mc^2$ implicava che l'energia fosse presente allo stato latente in ogni forma di materia e che anche solo un'esigua frazione della massa solare, pari circa all'uno per cento, sarebbe bastata a continuare a fare brillare il Sole. Negli anni Trenta se ne sapeva ormai abbastanza sull'energia nucleare per risolvere il problema, apparentemente paradossale, posto da Kelvin.

Il combustibile del Sole proviene dallo stesso processo che fa esplodere le bombe all'idrogeno. Gli atomi di idrogeno sono i più semplici: il loro nucleo è costituito solo da un protone. Tanto più caldo diventa il gas, tanto più velocemente si muovono gli atomi che lo costituiscono. Nel nucleo del Sole i protoni cozzano insieme con tanta forza da rimanere attaccati l'uno all'altro. Una serie di reazioni può fondere quattro nuclei di idrogeno (quattro protoni) in un unico nucleo di elio. Il nucleo di elio, però, pesa lo 0,7 per cento in meno dei quattro nuclei di idrogeno che lo costituiscono. Il che significa che la fusione dell'idrogeno in elio libera 0,007 mc^2: quanto basta per far ardere il Sole per vari miliardi di anni. L'energia che si libera in una stella è stazionaria e "controllata"; non è esplosiva come quella di una bomba. Infatti, spinge via dal centro gli strati esterni con una forza che basta giusto giusto a "tener chiuso il coperchio", nonostante le enormi pressioni del nu-

cleo stellare. Il Sole è regolato in modo tale che la fusione fornisce potenza esattamente al tasso richiesto per equilibrare il calore che si disperde dalla sua superficie. È da quel calore che dipende la vita sulla Terra.

Almeno in linea di massima, come funzioni il Sole ormai lo capiamo. I dibattiti correnti si focalizzano su dettagli più fini. Che cos'è che provoca le macchie solari e i turbolenti brillamenti sulla sua superficie? Come possiamo saperne di più sul suo interno profondo? Brilla in modo stazionario, o la sua luminosità è fluttuante, al punto d'influenzare il clima terrestre?

Il Sole è nato in una nube interstellare, o *nebulosa*. La nube cominciò a ruotare dapprima in modo quasi impercettibile, ma la rotazione divenne sempre più veloce via via che si contraeva (pensate a una pattinatrice artistica quando ritrae le braccia); si produsse una forza centrifuga fino a che non fu equilibrata dalla gravità. Si formò allora un disco rotante intorno a un proto-Sole centrale che andava sgonfiandosi molto gradualmente (più o meno come Kelvin aveva immaginato). Ma questa lenta contrazione si fermò quando il centro divenne così caldo da innescare la fusione dell'idrogeno. Nel frattempo il disco intorno si era raffredato; parte dei gas si condensarono in polveri e frammenti di roccia, che si agglomerarono formando pianeti.

Il Sole stesso, intorno al quale orbitava ormai un sistema planetario, trovò un equilibrio, fondendo lentamente ma costantemente l'idrogeno in elio. Questo processo può rilasciare così tanto calore che finora è stata fusa solo meno della metà dell'idrogeno che si trova nel centro del Sole, anche se lui è ormai vecchio di quattro miliardi e mezzo di anni. Continuerà a brillare per altri 5 miliardi di anni. E poi si gonfierà fino a diventare una gigante rossa, abbastanza grande e luminosa da inghiottire i pianeti interni e da vaporizzare ogni forma di vita sulla Terra. E dopo questa fase di gigante rossa, alcuni strati esterni verranno espulsi, lasciando un nucleo che si contrarrà fino a diventare una nana bianca: una stella densa, non più grande della Terra, anche se centinaia di migliaia di volte più pesante. E questa debole stella – luminosa quanto lo è oggi la

Luna – continuerà a brillare di una luminescenza azzurrina su ciò che potrà essere rimasto del sistema solare.

Altre stelle

La luminosità e il colore di una stella come dipendono dalla sua massa, dalla sua età, dalla materia da cui è composta? Gli astrofisici possono ormai rispondere a queste domande. Possono calcolare, con altrettanta facilità che nel caso dell'evoluzione del Sole, i cicli vitali di stelle che hanno iniziato la loro esistenza con più o meno massa: metà della massa del Sole, o il doppio, il quadruplo, e così via. Le stelle più pesanti sono più luminose e percorrono il loro ciclo vitale più velocemente. L' *input* di questi calcoli è ciò che i fisici hano appreso negli esperimenti di laboratorio sui nuclei e gli atomi.

Ma come si fa a controllare sperimentalmente affermazioni di questo tipo? Le stelle vivono così a lungo a confronto degli astronomi che non abbiamo altro che "istantanee" di un attimo della vita di ciascuna di loro. Nondimeno, osservando intere popolazioni di stelle, le nostre teorie le *possiamo* controllare. Anche gli alberi vivono centinaia d'anni, ma, se non aveste mai visto un albero, vi basterebbe passare un pomeriggio in una foresta per dedurre quale sia il loro ciclo vitale: potreste osservare degli arboscelli, degli esemplari completamente sviluppati e anche alcuni alberi morti. È William Herschel, il grande astronomo del Settecento che scoprì Urano e osservò la Via Lattea, a offrirci questa pittoresca metafora:

> Non è forse quasi lo stesso poter vivere tanto da poter osservare la germinazione, lo sbocciare [...] e poi l'appassire di una pianta o che invece un gran numero di esemplari, scelti da ogni stadio che la pianta attraversa, ci siano messi sotto gli occhi tutti in una volta?

È più facile osservare le stelle quando si trovano nelle fasi più brillanti della loro evoluzione. Stelle che tutti conoscono,

come Betelgeuse o Arturo, si trovano nella fase "gigante". I "terreni di coltura" migliori per controllare le nostre teorie su come si evolvano le stelle sono i cosiddetti ammassi globulari – sciami anche di un milione di stelle, di grandezze diverse, formatesi tutte alla stessa epoca, tenuti insieme dalla reciproca attrazione gravitazionale.

Le nane bianche, le "ceneri" lasciate da stelle come il Sole, sono molto comuni nella nostra Galassia. Ma è difficile studiarle perché brillano molto debolmente. Quelle che si sono formate da poco hanno superfici molto calde (e sono più azzurre che bianche); ma gradualmente si raffreddano, dato che non possono più ricavare energia nucleare che compensi quella che irraggiano nello spazio. Possiamo inferire la temperatura delle nane bianche dal loro colore (via via che si raffreddano si fanno più rosse) e la teoria ci dice anche la loro età (vale a dire il tempo che è passato da quando le stelle che le hanno generate esaurirono il loro combustibile nucleare). Le più fredde sono vecchie di vari miliardi di anni: fatto che da solo ci insegna che alcune stelle avevano consumato tutto il loro combustibile nucleare prima che il nostro sistema solare vedesse la luce.

Morti violente

Non tutto avviene lentamente nel cosmo. A volte le stelle esplodono in modo catastrofico come supernove. Una supernova vicino a noi arde fiammante nel cielo notturno per qualche settimana, di gran lunga più luminosa di qualunque altro oggetto celeste.

Il più famoso di questi eventi fu osservato in Cina molti secoli fa. "Il giorno chi-chhou del quinto mese del primo anno del regno Chih-Ho" (luglio 1054 d.C.) Yang Wei-Te, il Capo dei Calcolatori del Calendario (forse l'equivalente cinese-antico dell'Astronomo Reale inglese) si rivolgeva al suo imperatore con queste deferenti parole: "Prostrandomi davanti alla

Vostra Maestà, Le significo l'apparizione di una stella ospite. Essa era di colore giallo, leggermente iridescente".

Oggi, quasi mille anni dopo, vediamo ancora i resti di quell'esplosione cui assistette Yang Wei-Te: un ovale bluastro, contenente filamenti di gas che si espandono da un centro comune. Viene chiamata Nebulosa del Granchio. Rimarrà visibile, espandendosi e svanendo lentamente, per qualche millennio ancora; poi diventerà così diffusa da fondersi coi gas e le polveri molto rarefatti che pervadono lo spazio interstellare.

La supernova esplosa più vicina a noi nel XX secolo – non così vicina come la Nebulosa del Granchio, ma sufficientemente luminosa da poter essere studiata in dettaglio – fu vista nel 1987. Nella notte fra il 23 e il 24 febbraio Ian Shelton, un astronomo canadese che osservava il cielo sulle Ande cilene, si accorse di un "nuovo" astro del cielo meridionale, in una concentrazione stellare nota come la Grande Nube di Magellano. La sua luminosità e il suo successivo e graduale svanire sono stati seguiti non solo dai telescopi ottici, ma anche dagli astronomi che usano altre tecniche moderne – telescopi a raggi X e a raggi gamma – che ci hanno aperto nuove "finestre" sull'universo. I teorici hanno avuto una rara e fortunata possibilità di controllare i loro complessi calcoli.

Alchimia cosmica

Questi eventi affascinano gli astronomi, ma chi altro mai si dovrebbe interessare di stelle che esplodono migliaia di anni luce lontano da noi? Perché mai fatti del genere dovrebbero preoccupare il 99,9 per cento della gente, i cui interessi professionali sono di natura ben più terrestre? Beh, perché se non fosse per le supernove, le complessità della vita sulla Terra non si sarebbero mai verificate e, poco ma sicuro, noi non saremmo qui.

Sulla Terra si trovano in natura novantadue tipi di atomi differenti, ma alcuni sono molto più comuni di altri. Per ogni

10 atomi di carbonio se ne trovano 20 di ossigeno e circa 5 di azoto e di ferro. Ma l'oro è centinaia di milioni di volte più raro dell'ossigeno e altri elementi – l'uranio, per esempio – sono più rari ancora.

Tutto ciò che è stato scritto in una lingua occidentale è fatto a partire da un alfabeto di appena 26 lettere circa. Similmente, gli atomi possono combinarsi in molecole secondo un vasto numero di modi diversi. Alcune molecole sono abbastanza semplici – come l'acqua (H_2O) o l'anidride carbonica (CO_2) – altre contengono migliaia di atomi. Gli ingredienti più importanti di un essere vivente (noi compresi) sono gli atomi di carbonio e di ossigeno, collegati, insieme ad altri, in molecole che formano catene di grande complessità. Se questi atomi non fossero comuni sulla Terra noi non potremmo esistere.

Gli atomi sono a loro volta costituiti da particelle più semplici. Ciascun tipo di atomo ha un suo specifico numero di protoni (con carica elettrica positiva) all'interno del nucleo e un ugual numero di elettroni (con carica negativa) che gli orbitano intorno. Tale numero è detto numero atomico: quello dell'idrogeno è 1, quello dell'uranio 92.

I nuclei di tutti gli atomi sono costituiti dalle stesse particelle elementari (protoni e neutroni): non c'è quindi da stupirsi se possono essere trasmutati l'uno nell'altro. È ciò che accade, per esempio, nel corso di un'esplosione nucleare; ma i nuclei sono così "robusti" che non possono venir distrutti dalle reazioni chimiche che si verificano negli esseri viventi o nei laboratori.

I differenti tipi di atomi che si trovano sulla Terra esistono, negli stessi rapporti tra loro, da quando si formò il sistema solare, circa quattro miliardi e mezzo di anni fa: nessun processo terrestre naturale può creare o distruggere gli atomi.[1] Ci piacerebbe poter capire perché siano stati distribuiti, quasi una smazzata di *bridge*, con questi particolari rapporti. Potremmo dire che le cose stanno così, punto e basta: forse un creatore si divertì a girare 92 manopole diverse. Ma viene naturale cercare una spiegazione un po' meno *ad hoc*, e sforzarsi

di risalire dalle strutture complesse ai loro semplici inizi. Gli astronomi hanno fornito gli indizi chiave per questo problema: sembra che in effetti l'universo abbia cominciato la sua carriera solo con atomi semplici, che si fusero e si trasmutarono in quelli più pesanti all'interno delle stelle.

Nemmeno il centro del Sole è abbastanza caldo per operare queste alchimie. Ma i nuclei delle lucentissime stelle azzurre come quelle che si vedono nella Nebulosa di Orione, e gli eventi catastrofici con cui alla fine esplodono, possono trasformare i vili metalli in oro.

Le stelle che hanno una massa dieci volte più grande di quella solare brillano con assai maggiore luminosità; e si evolvono in modi assai più complicati e spettacolari. Il loro idrogeno viene consumato e trasformato in elio nel giro di un centinaio di milioni di anni – meno dell'uno per cento della vita del Sole. La gravità, poi, spreme assai di più queste stelle così pesanti, e la loro temperatura centrale sale ancora, fino a che gli atomi di elio possono attaccarsi insieme formando nuclei di atomi più pesanti: carbonio (6 protoni), ossigeno (8 protoni) e ferro (26 protoni). Si forma una specie di struttura a cipolla: uno strato di carbonio ne circonda uno di ossigeno, il quale a sua volta ne circonda un altro di silicio. Gli strati interni più caldi sono stati trasmutati fino a elementi ancora più in su nella tavola periodica degli elementi, e avvolgono un nucleo fatto principalmente di ferro.

Quando tutto il combustibile è stato consumato (in altre parole, quando il suo caldissimo centro è stato trasformato tutto in ferro), le stelle grandi sono di fronte a una crisi. Un'implosione catastrofica ne comprime il nucleo fino alla densità di un nucleo atomico, scatenando un'esplosione colossale che disperde nello spazio gli strati esterni scagliandoli via alla velocità di 10.000 chilometri al secondo. L'esplosione si manifesta come una supernova, del tipo di quella che ha dato origine alla Nebulosa del Granchio. In ciò che resta sono contenuti i risultati di quell'alchimia nucleare che ha fatto ardere la stella per tutto il corso della sua vita. Nel miscuglio c'è moltissimo ossigeno e carbonio; si trovano poi tracce di molti

altri elementi formatisi nell'esplosione. La "mistura", per come la calcoliamo, presenta rapporti fra i vari elementi graziosamente vicini a quelli che possiamo oggi osservare nel sistema solare.

Un po' di storia

Fu Hans Bethe (uno dei pionieri della fisica nucleare) il primo a chiarire, negli anni Trenta, in che modo venga liberata l'energia all'interno del Sole.[2] Il calcolo accurato di ciò che accade nei nuclei delle stelle – specialmente nel corso delle ultime e più calde fasi che precedono l'esplosione della supernova – coinvolge lo studio di reti di reazioni nucleari molto complesse, e avrebbe dovuto aspettare l'avvento dei computer. Il risultato dipende in modo piuttosto delicato dai dettagli della fisica nucleare. (Alcune delle tecniche necessarie per svolgere questi calcoli intricati sono state escogitate da specialisti della progettazione di armi nucleari. Non c'è molto da stupirsi, dunque, se i primi calcoli dettagliati relativi alle supernove siano venuti dal Livermore Laboratory americano e da istituzioni simili, come dai loro corrispettivi sovietici.) La carriera di Hans Bethe abbraccia ormai un arco di settant'anni. Fu a capo del reparto teorico di Los Alamos, quando fu progettata e costruita la prima bomba atomica; nel corso dell'ultimo mezzo secolo è stato un difensore instancabile del controllo degli armamenti. Ma era e resta – assai notevolmente – all'avanguardia della teoria delle supernove.

Che relazione c'è fra le stelle e gli elementi che ci circondano? Perché il carbonio e il ferro sono comuni, mentre l'oro è così raro? Fu Fred Hoyle, nel tempo libero che gli restava dal lavoro sull'invenzione e la costruzione del radar durante la Seconda Guerra Mondiale, a concepire la prima risposta chiara a queste domande.

Se Fred Hoyle fosse nato una decina di anni prima avrebbe forse condiviso i trionfi dell'età eroica che la fisica teorica celebrò fra il 1925 e il 1930. Nel breve corso di quegli anni venne formulata la teoria dei quanti e fu messo ordine nelle proprietà, apparentemente paradossali, degli atomi, degli elettroni e della radiazione. Non c'è scienziato, cosmologo o biologo che sia, che non debba concedere che la meccanica quantistica sorpassa ogni altra invenzione concettuale per la vastità delle sue ramificazioni e per la scossa che le sue "controintuitive" conseguenze hanno dato alla nostra immagine della natura; il micromondo è altrettanto terribilmente strano di quanto lo possa essere il cosmo. Ma non c'è una solitaria "figura-Einstein" cui attribuire il merito della teoria dei quanti: questa nuova visione del mondo fu fondata piuttosto da una geniale coorte di giovani ricercatori: Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg, Paul Dirac.

La fine degli anni Trenta era un periodo di consolidamento dopo le nuove idee rivoluzionarie degli anni Venti. Dirac, che allora era professore a Cambridge, diede a Hoyle, che si era appena laureato, questo consiglio: "Nel 1926 anche la gente che non era particolarmente in gamba poteva fare del buon lavoro in fisica fondamentale. Oggi [1938] anche uno *molto bravo* non ha problemi importanti da risolvere". Così Hoyle si dedicò alle stelle. Si mise a congetturare su come potessero comportarsi i nuclei atomici a temperature ultraelevate, basandosi su ciò che aveva imparato su di essi.

Hoyle sapeva che gli atomi più pesanti, quelli più in basso nella tavola periodica degli elementi, tendono a essere più rari sulla Terra. Il magnesio e il silicio sono meno abbondanti dell'ossigeno; e i metalli preziosi sono milioni di volte più rari. Ma c'è un'eccezione a questa tendenza generale: il ventiseiesimo elemento, il ferro, è relativamente comune, così come i suoi vicini nella tavola periodica. Hoyle aveva anche imparato che il ferro e i suoi vicini sono i nuclei con la più alta "energia di legame": sono i più stabili, e occorre molta energia sia per scinderli, sia per trasmutarli in nuclei ancora più pesanti. I vari elementi chimici non potrebbero dunque essere stati il risultato di una trasmutazione nucleare? Anche senza conoscere dettagliatamente la rete di reazioni, si può fiduciosamente inferire che i nuclei atomici che si trovano intorno al picco di

abbondanza del ferro, una volta formatisi, sarebbero stati più difficili da distruggere. Le loro abbondanze relative avrebbero dato così luogo a un "picco del ferro".

Ma processi di questo genere richiedono un ambiente in cui i nuclei possano effettivamente trasmutarsi l'uno nell'altro. E questa è una richiesta molto forte per i nuclei più pesanti: essi si respingono l'un l'altro con molta più intensità a causa della carica elettrica che nel loro caso è più grande (il ferro trasporta la carica di 26 protoni); per fonderli o scinderli sono necessari impatti con energia molto più alta di quanta ce ne voglia per convertire l'idrogeno (carica uno) in elio (carica due). La velocità media di un atomo in un gas dipende dalla sua temperatura, per cui una trasmutazione del genere richiede temperature estreme. Per la fusione dell'idrogeno nel Sole ci vogliono 15 milioni di gradi. Ma Hoyle stimò che l'ambiente in cui furono forgiati gli elementi del picco del ferro dovesse essere centinaia di volte più caldo: più di un *miliardo* di gradi.

Hoyle pubblicò le sue preveggenti congetture nel 1946. Sosteneva che tutti gli elementi "pesanti" presenti sulla Terra si fossero costituiti a partire da nuclei più semplici all'interno di stelle che, nel corso della loro successiva evoluzione, avessero raggiunto temperature dell'ordine del miliardo di gradi. Le stelle come il Sole non diventano mai tanto calde quanto Hoyle pensava. E quelle più grandi?

Hoyle fu incoraggiato nello sviluppare queste sue originali idee dall'indizio che gli fornivano le percentuali relative degli elementi presenti sulla Terra. Ma questi rapporti sono in qualche modo "tipici" per l'universo intero? Da un certo punto di vista, no. L'idrogeno e l'elio sono troppo volatili perché possano essere stati trattenuti efficacemente sulla proto-Terra; così i due elementi più leggeri (che oggi sappiamo essere di gran lunga i più abbondanti nel Sole) sono sottorappresentati sulla Terra. I rapporti tra gli altri elementi potrebbero, però, essere tipici del sistema solare.

Ma che dire delle stelle del resto dell'universo? Di cosa sono fatte? Centocinquanta anni fa il filosofo francese Auguste

Comte riteneva che non ci fosse alcuna risposta a questa domanda. Nel suo *Cours de philosophie positive* scriveva: "Non potremo mai studiare, con nessun metodo, la composizione chimica o la struttura mineralogica delle stelle. [...] La conoscenza positiva delle stelle è necessariamente limitata ai loro fenomeni meccanici e geometrici". Ma il XIX secolo non era ancora finito che già gli astronomi erano in grado di apprezzare la ricca informazione trasportata dalla luce stellare. Quando la luce passa attraverso un prisma e si disperde in uno spettro, si possono osservare i colori caratteristici delle varie sostanze: ossigeno, sodio, carbonio, ecc. L'elemento elio, il numero due della tavola periodica, non fu identificato sulla Terra fintanto che le sue particolari caratteristiche spettrali non vennero osservate nello spettro della luce solare. Le stelle sono fatte degli stessi atomi che troviamo qui sulla Terra. Ma si è dimostrato un compito più sottile – e di quelli che impegnano ancora molti astrofisici – usare questi spettri per inferire l'abbondanza relativa dei vari atomi nelle varie stelle e nelle nebulose.

Per dar sostanza alle idee di Hoyle servivano dati migliori sulle reazioni nucleari che svolgono un ruolo particolarmente cruciale. Con le sue teorie Hoyle riuscì a far entusiasmare W.A. (Willy) Fowler, un fisico del Caltech, che concentrò gli sforzi del suo laboratorio su misure d'interesse astronomico. Lo schema completo della nucleogenesi cosmica, per come si poteva conoscerla nel 1957, fu codificato da Hoyle e da Fowler in un articolo lungo quanto un libro, scritto insieme a due loro colleghi, Geoffrey e Margaret Burbridge. L'articolo è ormai un classico, noto a tutti gli astronomi come B^2FH dalle iniziali dei suoi autori, e ha resistito alla prova del tempo.

Il progresso più importante effettuato dopo B^2FH riguarda gli elementi che si trovano oltre il ferro nella tavola periodica. Infatti, siccome il ferro è il nucleo atomico con maggiore energia di legame, nel creare nuclei ancora più pesanti come il piombo o l'uranio non si libera energia, bisogna invece *fornirla*. Le idee chiave in questo campo sono venute da giovani collaboratori americani di Hoyle che hanno lavorato insieme

a lui nel corso di regolari visite estive al suo istituto di Cambridge. Nel corso dell'esplosione di una supernova si verifica un processo detto "nucleosintesi esplosiva", durante il quale i materiali vengono improvvisamente riscaldati da un'onda d'urto, che si apre una strada verso l'esterno squarciando la stella.

L'ecologia della Via Lattea

Primo Levi racconta in *Il sistema periodico* l'avventurosa storia di un tipico atomo di carbonio qui sulla Terra:

> Giace da centinaia di migliaia di anni, legato a tre atomi di ossigeno e a uno di calcio, sotto forma di roccia calcarea. Ha già una lunghissima storia cosmica alle spalle, ma la ignoreremo... Un colpo di piccone lo staccò dalla roccia e gli diede l'avvio verso il forno a calce, precipitandolo nel mondo delle cose che mutano. Venne arrostito affinché si separasse dal calcio [...] lui uscì per il camino e prese la via dell'aria [...]. Fu colto dal vento, abbattuto al suolo, sollevato a dieci chilometri. Fu respirato da un falco, discese nei suoi polmoni precipitosi ma non penetrò nel suo sangue ricco e fu espulso. Si sciolse tre volte nell'acqua di un torrente in cascata e ancora fu espulso. Viaggiò col vento per otto anni: ora alto ora basso, sul mare fra le nubi, sopra foreste e deserti e smisurate distese di ghiaccio, poi incappò nella cattura e nell'avventura organica. [...] Ebbe la fortuna di rasentare una foglia, di penetrarvi e di esservi inchiodato da un raggio di sole [...] in un istante, come un insetto preda del ragno, viene separato dal suo ossigeno e combinato con idrogeno e (così si crede) fosforo e infine inserito in una catena, lunga o breve non importa, ma è la catena della vita. [...] È di nuovo tra noi, in un bicchiere di latte [...] viene ingoiato [...] la catena viene meticolosamente frantumata e i frantumi uno per uno accettati o respinti. Uno, quello che ci sta a cuore, varca la soglia intestinale ed entra nel torrente sanguigno, migra, bussa alla porta di una cellula nervosa, entra e soppianta un altro carbonio che ne faceva parte. Questa cellula appartiene a un cervello e questo è il

> mio cervello, di me che scrivo e la cellula in questione, e in essa l'atomo in questione, è addetta al mio scrivere in un gigantesco minuscolo gioco che nessuno ha ancora descritto. È quella che in questo istante fa sì che la mia mano corra in un certo cammino sulla carta [...] [quella che] guida questa mia mano a imprimere sulla carta questo punto: questo.

La teoria dell'evoluzione e della nucleogenesi, un indubbio trionfo dell'astrofisica del XX secolo, estende la storia degli atomi a prima della formazione della Terra. Una galassia assomiglia a un grande ecosistema. L'idrogeno primordiale viene trasmutato dentro le stelle e forma i mattoni essenziali per la vita: carbonio, ossigeno, ferro, e tutto il resto. Alcuni di questi materiali vengono restituiti allo spazio interstellare per essere poi riciclati in una nuova generazione di stelle.

La nostra Galassia, la Via Lattea, è un enorme disco con un diametro di centomila anni luce e contiene centinaia di miliardi di stelle. Le sue stelle più vecchie si formarono più di dieci miliardi di anni fa. Il materiale primordiale era costituito solo dagli atomi più semplici – niente carbonio, niente ossigeno, niente ferro. Il nostro Sole è una stella di mezza età; altre stelle sono vecchie anche il doppio di lui. Prima ancora che esso si formasse quattro miliardi e mezzo di anni fa, varie generazioni di stelle di grande massa poterono percorrere per intero il loro ciclo vitale. Gli atomi chimicamente interessanti, quelli essenziali per la complessità e la vita, furono forgiati in quelle stelle. Nei rantoli dell'agonia, esplosero in supernove, scagliando questi atomi nello spazio interstellare.

A differenza di Primo Levi, proviamo a seguire un atomo di carbonio, nella "lunghissima storia cosmica" che ha alle spalle. Forgiato in un'antica supernova con atomi di elio, potrebbe aver vagato per centinaia di milioni di anni fra le stelle. Potrebbe poi esser capitato in una nube interstellare, che collassava sotto l'azione della sua stessa gravità formando nuove stelle. L'atomo potrebbe essere poi finito nel nucleo di qualche nuova stella molto brillante, per essere ulteriormente lavorato in modo da formare altri elementi della tavola periodi-

ca (silicio, o ferro) per essere poi scagliato fuori di nuovo, in un'altra supernova. O potrebbe invece essere finito nei pressi di una stella meno massiccia, circondata da un disco gassoso in rotazione che si andava condensando in un gruppo di pianeti. Una stella di questo tipo avrebbe potuto essere proprio il nostro Sole. Quest'atomo di carbonio potrebbe così essersi ritrovato nella Terra che si era appena formata, svolgendo il suo ruolo nei processi geologici che ne modellarono e temperarono la superficie; e poi nella chimica da cui emersero le specie viventi, e poi nell'evoluzione: finendo, forse, in una delle cellule cerebrali di Primo Levi.

Nonostante le regolarità che si osservano nei rapporti *rispettivi* degli elementi pesanti, le quantità di carbonio, ossigeno, sodio, e via dicendo, *in rapporto all'idrogeno* non sono affatto le stesse dappertutto. La loro abbondanza relativa è *minore* nelle stelle *più vecchie*. Naturalmente, è proprio questo che ci aspetteremmo di trovare se tali elementi sono stati sintetizzati gradualmente, una generazione di stelle dopo l'altra. Le stelle più vecchie, che si sono formate all'inizio della storia galattica, si sarebbero condensate da materiali interstellari che non erano così pesantemente inquinati come lo sono oggi (e come lo erano quando si sono formate le stelle più giovani). Si riscontra anche un'altra tendenza: l'abbondanza relativa degli elementi pesanti è maggiore in luoghi dove la formazione stellare è più veloce e il riciclaggio dei materiali più efficiente.

Quando la nostra Galassia era giovane, non c'era carbonio, ossigeno o ferro; la chimica sarebbe stata una materia ben noiosa. Prima che potessero formarsi composti chimici complessi, e prima che potesse emergere un sistema solare, le stelle antiche dovevano svolgere il lavoro di base: sintetizzare, trasmutare e riciclare gli elementi chimici.

Gli atomi di carbonio – ogni singolo atomo di carbonio del vostro sangue, del vostro cervello e dell'inchiostro di questa pagina – hanno un *pedigree* che risale a molto prima che nascesse il nostro sistema solare, quattro miliardi e mezzo di anni fa. Il sistema solare stesso si condensò a partire dai resti che

si erano andati mescolando di molte stelle precedenti. E se risalissimo ancora più indietro nelle storie degli atomi – fino, per esempio, a sette miliardi di anni fa – li troveremmo dispersi per l'intera Galassia. Gli atomi che oggi sono legati insieme in un filamento di DNA si trovavano allora in varie stelle della Galassia, o dispersi nel mezzo interstellare.

Nel lontano futuro, quando il sistema solare sarà ormai morto, questi atomi si disperderanno di nuovo nella Galassia, finendo dentro nuove stelle. Il fatto che siano oggi intrappolati nella stessa molecola di DNA è un passeggero evento biochimico; analogamente, da una prospettiva astrofisica, il fatto che siano intrappolati nello stesso sistema solare rappresenta anch'esso una fase passeggera di una storia che risale a prima della formazione della Galassia e potrebbe estendersi in un futuro infinito.

Perché gli atomi di carbonio e di ossigeno sono così comuni sulla Terra, ma l'oro e l'uranio sono così rari? C'è una risposta a questo problema così quotidiano, ma è una risposta che porta a mettere in scena antiche stelle esplose nella nostra Via Lattea più di cinque miliardi di anni fa, prima della formazione del sistema solare. Il cosmo è un'unità. Per conoscere noi stessi dobbiamo conoscere le stelle. Siamo polvere di stelle. Siamo le ceneri di stelle morte tanto e tanto tempo fa.

Altri pianeti?

Le stelle si stanno formando anche ora. A una distanza di circa 1500 anni luce c'è la Nebulosa di Orione: gas, e polveri, in quantità sufficiente per produrre milioni di stelle. Contiene giovani stelle lucidissime; contiene anche protostelle che si stanno ancora condensando e non sono diventate abbastanza calde da far accendere il loro combustibile nucleare. Alcune di queste protostelle sono circondate da dischi rotanti di gas e polveri. Si tratta di protosistemi solari; qui le particelle di polvere si attaccano l'una all'altra formando rocciosi planetesimi,

piccole formazioni che si fonderanno insieme per creare pianeti.

Un tempo si usava credere che l'esistenza dei sistemi planetari dovesse essere attribuita a eventi improbabili e inusuali. C'era, per esempio, l'idea che un'altra stella fosse passata così vicino al Sole che gli effetti della gravità gli avrebbero strappato via un flutto di gas: raffreddandosi, questo gas avrebbe formato i pianeti. Ma è ormai chiaro che la formazione dei pianeti non richiede nessun raro "accidente". Essa è naturale compagna di quella stellare. Anzi, i pianeti sono inevitabili, a meno che il materiale da cui si forma la stella abbia una rotazione essenzialmente nulla, ed è *questo* che richiederebbe il verificarsi di qualche rara coincidenza.

I sistemi planetari dovrebbero dunque essere molto diffusi. Pianeti completamente formati in orbita intorno ad altre stelle ci apparirebbero, però, ben poco discernibili. Potremmo tuttavia rilevarne gli effetti indirettamente. Una stella e i suoi pianeti percorrono orbite imperniate intorno al loro centro di massa comune, detto anche "baricentro". Esso è, ovviamente, molto più vicino alla stella che ai pianeti perché la stella è molto più pesante. La stella si sposta, dunque, solo leggermente; ma misure abbastanza precise possono rilevare la lieve oscillazione indotta dai pianeti.

La prima prova veramente convincente dell'esistenza di un pianeta orbitante attorno a una stella *ordinaria*[3] si è però avuta solo nel 1995, quando Michel Mayor e Didier Queloz dell'osservatorio di Ginevra scoprirono che lo spostamento Doppler di 51 Pegasi, una stella simile al Sole e distante 40 anni luce, oscillava molto leggermente ogni quattro giorni. Sembra che un pianeta pesante almeno quanto Giove si muova su un'orbita molto vicina a questa stella. Questo pianeta sarebbe dieci volte più vicino alla sua stella di quanto Mercurio sia vicino al Sole e la sua superficie avrebbe una temperatura di oltre 1200 gradi Celsius. Ma potrebbe trattarsi solo del componente più grosso di un altro intero sistema solare. Nel giro di pochi mesi Geoffrey Marcy e Paul Butler (California) hanno scoperto pianeti intorno ad altre stelle. Questi hanno orbite più lente e

potrebbero trovarsi a una temperatura tale da permettere l'esistenza dell'acqua. Ma tutti questi pianeti sono molto grandi, addirittura più pesanti di Giove. Sarebbe mille volte più difficile rivelare l'esistenza di pianeti che pesino più o meno quanto la Terra.

I pianeti su cui può evolversi la vita, come è avvenuto qui sulla Terra, devono essere piuttosto speciali. La loro gravità deve attrarre con abbastanza forza da impedire all'atmosfera di evaporare nello spazio; non devono essere né troppo freddi né troppo caldi, e si devono dunque trovare alla giusta distanza da una stella longeva e stabile. Solo una piccola parte di pianeti soddisfa queste condizioni, ma i sistemi planetari sono – così si ritiene – un fatto tanto comune nella nostra Galassia che pianeti simili alla Terra si dovrebbero poter contare a milioni. I dirigenti della NASA hanno insistito che una ricerca dei pianeti dovrebbe diventare uno dei principali obiettivi del programma spaziale americano; si tratta di uno scopo di immenso interesse scientifico e, più di molti altri, tale da far infiammare il pubblico entusiasmo.

Il compito è difficile non solo perché un pianeta simile alla Terra apparirebbe debolissimo, ma perché il pianeta e la sua stella sarebbero così vicini nel cielo che nessun telescopio ottico esistente, nemmeno l'Hubble Space Telescope, riuscirebbe a produrre immagini abbastanza ben definite da poter separare i due oggetti. Deve essere utilizzata la tecnica dell'"interferometria", che prevede l'utilizzo di due telescopi separati e collegati. Per contro, i pianeti simili a Giove sono stati scoperti relativamente a buon mercato, usando telescopi di misura modesta situati al suolo, dotati però di un ingegnoso equipaggiamento per l'analisi della luce stellare, capace di rilevare i movimenti molto lievi della stella indotti da un pianeta orbitante.

La sfida tecnologica che pone il problema di scoprire effettivamente un pianeta simile alla Terra *non è* però insormontabile. E, una volta che si sia riusciti a trovare un candidato possibile, si potranno scoprire varie cose su di esso. Supponete che un astronomo che viva a una quarantina di anni luce da

noi abbia scoperto un pianeta – la nostra Terra. Gli apparirebbe, per dirla con Carl Sagan, come un "puntino azzurro pallido", molto vicino a una stella – il nostro Sole – che lo sorpassa in luminosità di molti milioni di volte. Se la riuscisse a vedere, potrebbe analizzare la luce della Terra, e scoprirebbe che è stata trasformata (e ossigenata) da una biosfera. La sfumatura azzurra potrebbe poi apparirgli leggermente diversa, a seconda che fosse in vista l'Oceano Pacifico o la massa terrestre dell'Eurasia. Il nostro remoto astronomo potrebbe dunque, replicando le sue osservazioni, concluderne che la Terra ruota, scoprire la lunghezza del suo giorno e inferire persino qualche elemento riguardante la sua topografia e il suo clima.

E la vita?

Come su un pianeta possa emergere la vita, anche ove si dia l'ambiente fisico adatto, è una questione che solleva problemi più sottili. La "vita" può assumere forme che non saremmo in grado di riconoscere e che non potremmo nemmeno concepire. Comunque, la probabilità che una vita di tipo terrestre possa emergere anche altrove dipende dalla risposta a due domande. Primo: con che frequenza si creano ambienti di tipo terrestre? Secondo: che probabilità c'è che la vita si sviluppi, *anche quando* le condizioni fisiche siano quelle ottimali?

Abbiamo già affrontato il primo interrogativo: i pianeti "adatti" dovrebbero essere comuni. Ma anche laddove la chimica, la temperatura e la gravità del pianeta fossero propizie, qual è la probabilità che la vita possa cominciare? Non c'è tuttora un consenso generale fra i biologi, anche se nel 1996 è venuto fuori un indizio allettante, quando sono state trovate esili tracce di materiali organici "fossili" in un meteorite che si ritiene sia stato scagliato via dalla superficie di Marte. Se la vita fosse veramente emersa indipendentemente sul nostro vicino planetario, le quote delle scommesse contro la possibilità che la "miccia verde" possa accendersi in un qualunque ambiente più o meno simile dovrebbero calare, e di molto. Ma la vita

marziana, ammesso che sia mai esistita, è ristagnata chiaramente a un livello molto primitivo. La complessa biosfera della nostra Terra potrebbe essere emersa nonostante le forti probabilità in contrario; e l'evoluzione dell'intelligenza potrebbe essere poco più che una fluttuazione. L'intero corso dell'evoluzione è stato incanalato da eventi "casuali": impatti di comete, estinzioni, e simili.

Se l'evoluzione della Terra dovesse tornare a svolgersi di nuovo, i risultati potrebbero essere completamente diversi. I biologi dicono che ci sarebbero comunque animali dotati di occhi, perché le testimonianze evolutive ci rivelano che gli *occhi*, in una forma o nell'altra, si sono sviluppati indipendentemente molte volte. Ma l'*intelligenza* dovrebbe emergere per forza? L'evoluzionista Ernst Mayr sostiene che l'intelligenza non è – a differenza degli occhi – un risultato generale dell'evoluzione, dato che sembra essersi prodotta una e una sola volta. Ma potrebbero esserci altri motivi per cui l'intelligenza non sarebbe in grado di evolversi seguendo varie vie indipendenti. Una volta che l'intelligenza sia emersa e si sia sviluppata oltre una certa soglia, essa controllerà la biosfera; la selezione naturale non potrà più correre a briglia sciolta. A meno che la specie dominante non provveda da sola a spazzarsi via, l'intelligenza non avrebbe mai una seconda possibilità indipendente di evolversi a partire da altre forme di vita.

Ammettendo pure l'esistenza di semplici forme di vita, non sappiamo quali probabilità queste abbiano di evolversi verso forme intelligenti. Né sappiamo, ammesso che l'intelligenza possa emergere, quanto a lungo possa durare. La vita intelligente potrebbe essere "naturale"; come anche il suo sviluppo potrebbe esser stato coinvolto in una catena di accidenti tanto eccezionalmente rari che niente di pur remotamente simile potrebbe mai essere accaduto in qualche altra parte della Galassia.

Perché la vita intelligente potrebbe essere molto rara

In effetti, ci sono motivi piuttosto forti per sospettare che la vita intelligente non sia un granché comune. Un vecchio argomento è fornito dalla domanda di Enrico Fermi: "E dove sarebbero?" Molte stelle sono di vari miliardi di anni più vecchie del nostro Sole, cosicché l'evoluzione avrebbe avuto, in altri luoghi, un discreto vantaggio rispetto a noi. E allora perché questi alieni non ci sono mai venuti a far visita? Perché non ci hanno almeno lasciato un segnale o un loro artefatto che ne tradisca chiaramente la presenza?

Un argomento di genere piuttosto diverso a proposito della rarità delle forme di vita avanzate è stato suggerito da Brandon Carter, un esperto di buchi neri che ritroveremo in altri capitoli. Carter parte dal ben noto fatto, di cui abbiamo già parlato, che il nostro Sole è circa a metà della sua vita. In altri termini si può dire che, a meno di un fattore 2, il tempo che abbiamo impiegato per evolverci è uguale alla durata della vita del Sole. Carter trova strano che queste due durate siano grossolanamente uguali. Gli esseri umani sono il risultato evolutivo di un immenso numero di generazioni di organismi che si sono succeduti l'un l'altro, i nostri precursori. La durata della vita del Sole è fissata da limitazioni fisiche del tutto diverse (e che capiamo molto meglio). Queste due scale temporali potrebbero differire, *a priori*, per molte potenze di dieci.

Carter ha proposto un nuovo punto di vista su queste due scale. Il suo ragionamento funziona pressapoco così. Il fatto che il tempo tipico per l'emergere dell'intelligenza debba essere lo stesso della durata della vita di una stella sembrerebbe essere una coincidenza piuttosto improbabile. Infatti, i processi che determinano queste due durate sono senza alcuna correlazione. La scala temporale tipica per l'evoluzione avrebbe dovuto essere (si potrebbe pensare) o molto più corta o molto più lunga. Se fosse molto più corta noi saremmo dei gran pigroni, e la domanda di Fermi sarebbe ineludibile. D'altro canto, se la scala biologica fosse *tipicamente molto più lunga* della vita delle stelle, sulla maggior parte dei pianeti l'evoluzione non andrebbe molto in là prima che la loro stella-madre muoia. Noi umani non saremmo qui, se non fosse che, qui sulla Terra, le tappe chiave dell'evoluzione si sono svolte in modo particolarmente veloce. La vita intelligente, del tipo che si sviluppa sui pianeti vicini alle stelle, dovrebbe, in questo caso, essere molto rara.[4]

Come colmare i gap culturali (cosmici)

L'unica cosa che possiamo dire con sicurezza è che la vita intelligente si è evoluta almeno una volta. E che, anche se è esistita altrove, potremmo essere incapaci di riconoscerla. Potrebbero esserci extraterrestri intelligenti che menano esistenze puramente contemplative, senza alcun desiderio di segnalarci la loro presenza. L'assenza di prove non è prova di assenza.

Le scansioni sistematiche del cielo alla ricerca di segnali artificiali rappresentano un gioco che vale la pena di giocare (nonostante le fortissime probabilità di insuccesso), vista l'importanza filosofica di un *qualunque* rilevamento. Queste intelligenze esterne potrebbero essere forme viventi "organiche"; come potrebbero benissimo essere macchine costruite da tali forme viventi, o evolutesi a partire da esse. In entrambi i casi, il "luogo comune" vuole che, con la massima probabilità, si rivelino per mezzo di segnali a *radiofrequenza*. I radiotelescopi sono di una sensibilità estrema, e ci vuole molta meno energia per trasmettere segnali rilevabili nella banda delle radiofrequenze di quanta ce ne voglia, per esempio, per trasmettere in quella ottica o alla frequenza dei raggi X. Le ricerche si sono concentrate sulla banda spettrale del "buco dell'acqua", compresa fra la lunghezza d'onda di 21 cm emessa dall'atomo d'idrogeno (H) e quella di 18 cm emessa dall'OH (composto questo che, insieme con un altro H forma, come si sa, una molecola d'acqua).

Dovrebbe essere facile ideare segnali che apparirebbero incontrovertibilmente artificiali. Per esempio, una serie come

1, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 29... attirerebbe sicuramente l'attenzione. Sono i numeri primi. Nessun processo naturale li potrebbe generare, ma sarebbero subito riconosciuti da qualsiasi civiltà interessata a raccogliere le radio onde provenienti dal cosmo.

Si potrebbe allora costruire un vocabolario fatto da una serie di messaggi accuratamente compattati, vocabolario con cui si potrebbero descrivere possibili argomenti comuni al ricevente e all'emittente: matematica elementare, fisica, astronomia. Il logico Hans Freudenthal ha scritto un libro intero (*Lincos: Design of a Language for Cosmic Discourse*, ovvero *Lincos: Un progetto di linguaggio per il discorso cosmico*) in cui specificava in dettaglio come ciò potrebbe essere realizzato. I segnali potrebbero anche trasmettere immagini e (tema comune nella fantascienza) istruzioni per replicare strutture tridimensionali. I siti potenziali più vicini sono comunque così distanti da noi che i segnali impiegherebbero vari anni fra andare e venire. Non foss'altro che per questo motivo, lasciando pur stare il "*gap* culturale", la trasmissione sarebbe soprattutto un monologo a senso unico. Ci sarebbe tutto il tempo per spedire una risposta meditata, ma non avrebbe alcun senso lanciarsi in un botta e risposta.

Gli ottimisti pretendono che questi segnali potrebbero contenere illuminanti messaggi. Messaggi di tale importanza che ci permetterebbero di saltare a piè pari secoli di sforzi e scoperte scientifiche. O di essere avvertiti e tutelati da potenziali catastrofi. Ma un *gap* culturale di questo tipo potrebbe essere difficile da colmare, persino all'interno della civiltà umana. Un breve "messaggio dal futuro" avrebbe, per esempio, potuto davvero guidare una mente illuminata di qualche nostra antica era verso alcuni aspetti della moderna conoscenza scientifica? O forse Newton avrebbe potuto venir distolto dai suoi studi alchemici e indirizzato verso la chimica, perché spinto a guardare nel suo prisma lo spettro delle fiamme prodotte da diverse sostanze infuocate? Aristotele avrebbe potuto essere indirizzato verso idee più moderne in astronomia e biologia? Ci si potrebbe porre facilmente molte altre domande di questo tipo. È una sfida che intimidirebbe chiunque quella di saltare d'un colpo anche solo alcuni secoli della nostra evoluzione culturale, in quanto il progresso scientifico dipende da avanzamenti *graduali* delle tecniche e delle tecnologie a esso correlati.

Il *gap* culturale con gli extraterrestri potrebbe essere insormontabile. Ma *il semplice fatto di ricevere segnali artificiali* avrebbe di per sé un'importanza maggiore di qualunque suggerimento o avvertimento che questi messaggi potrebbero trasmetterci a proposito dell'ambiente che condividiamo. Sapremmo che la nostra Terra non è più il solo posto in cui si è evoluto qualcosa di "interessante" e che i concetti della logica e della fisica non sono una particolarità dell'*hardware* contenuto nei nostri crani.

In vari paesi sono stati utilizzati radiotelescopi per scandire il cielo alla ricerca di trasmissioni artificiali. Ma persino questi tentativi su piccola scala se la sono vista brutta nel trovare finanziamenti pubblici perché l'argomento è ingombrato da connotazioni manifestamente scabrose (UFO e roba del genere). Ma non c'è dubbio che l'interesse del pubblico sia molto più fortemente indirizzato verso questa ricerca che verso qualsiasi altra branca tradizionale della fisica e dell'astronomia. Se fossi uno scienziato americano e dovessi dare il mio parere a un comitato del Congresso, mi sentirei molto più a mio agio a chiedere fiduciosamente dieci milioni di dollari (meno di quanto incassino in una settimana certi film di fantascienza) per ricerche sull'intelligenza extraterrestre (SETI, Search for Extraterrestrial Intelligence) che a cercare finanziamenti per un acceleratore da dieci *miliardi* di dollari per studiare la fisica subatomica.

Si potrebbero fare pesanti scommesse contro la possibilità che la vita intelligente si sia sviluppata in qualche altro posto della nostra Galassia – si potrebbe addirittura pensare che non ne esista affatto in nessuna parte dell'universo che possiamo osservare. C'è chi potrebbe trovare deprimente il sentirsi solo in un vasto cosmo privo di menti. Ma io tenderei a reagire nel modo opposto. Da certi punti di vista sarebbe senz'al-

tro deludente se le ricerche SETI fossero destinate al fallimento. Ma, in una prospettiva cosmica, potremmo in questo caso concepire la nostra Terra un po' meno umilmente di quanto non meriterebbe se il nostro universo brulicasse tutto di forme di vita avanzate.

Una coincidenza cosmica

Perché possa emergere la vita le condizioni locali devono essere quelle "giuste"; ma anche l'universo nel suo complesso deve esserle propizio. Le leggi fisiche devono permettere agli atomi di combinarsi in molecole complesse in un ambiente riscaldato da una stella stabile. Devono esistere estensioni di spazio e di tempo abbastanza grandi da permettere alle stelle di evolversi e da permettere che i loro prodotti di scarto nucleari possano essere riciclati in una nuova generazione di stelle, alcune delle quali accompagnate da pianeti. Sono richieste pesanti: un universo "tipico" non le potrebbe soddisfare. Come discuteremo nel seguito del libro, in questi vincoli stanno racchiusi indizi sull'origine dell'universo, del nostro e forse anche degli altri.

Fu Fred Hoyle il primo a evidenziare un vincolo di questo tipo. Si era reso conto che, a livello atomico, i pezzi per costruire la vita potevano essere stati fabbricati nelle stelle, ma che le trasmutazioni richieste si verificavano solo perché i nuclei atomici hanno proprietà alquanto speciali che, a un fisico nucleare, sembrerebbero solo un sorprendente "accidente".

All'inizio degli anni Cinquanta Hoyle meditava su come possano le stelle creare atomi di carbonio e ossigeno: elementi che abbondano nel cosmo e che sono ovviamente di importanza cruciale per la vita. Un nucleo di carbonio, con i suoi sei protoni e i suoi sei neutroni, si forma a partire da tre nuclei di elio (due protoni e due neutroni). È improbabile che tre nuclei di elio si scontrino simultaneamente, persino nel denso centro di una stella. È assai più probabile che ci siano due successive collisioni "a due corpi": la prima formerebbe il berillio, il cui nucleo contiene quattro protoni e quattro neutroni; e poi, con una collisione distinta, verrebbe catturato un altro nucleo di elio, in modo da formare il carbonio.

Ma qui sembrava esserci un problema fatale. Il berillio prodotto in questo modo è molto instabile.[5] La durata della sua vita media, nota da esperimenti di laboratorio, è così breve che sembravano esserci ben poche possibilità che un nucleo di berillio potesse catturare un terzo nucleo di elio prima di decadere. Non c'era modo di passare attraverso questo collo di bottiglia, a meno che il berillio e l'elio non potessero attaccarsi insieme con grande facilità e velocità. Hoyle si rese conto che ciò poteva accadere solo se si fosse verificata una cosiddetta "risonanza" nel nucleo del carbonio, la cui energia coincidesse con quella dei nuclei di berillio e di elio prima della collisione. La richiesta era, per essere un po' più precisi, che l'energia totale (mc^2) di un nucleo di carbonio in questo stato risonante dovesse uguagliare la somma delle energie dei due nuclei di berillio e di elio sommate insieme, e dell'energia cinetica del loro impatto.

All'inizio degli anni Cinquanta i nuclei di carbonio non erano stati ancora ben studiati. Hoyle aveva da poco iniziato la sua fruttuosa collaborazione con il fisico nucleare californiano Willy Fowler. Riuscì ad allettare Fowler e i suoi colleghi, che si misero a controllare se i nuclei di carbonio potessero comportarsi come diceva lui. E gli esperimenti rivelarono che effettivamente esisteva una "risonanza" che combaciava con le aspettative di Hoyle. Le energie delle particelle elementari sono misurate in unità dette *elettronvolt* – nelle reazioni chimiche vengono liberate energie dell'ordine al più di qualche elettronvolt per atomo. Le reazioni nucleari coinvolgono energie milioni di volte maggiori di quelle delle reazioni chimiche, cosicché l'unità usuale è il MeV: il mega elettronvolt, un milione di elettronvolt. Hoyle aveva predetto una "risonanza"nel nucleo del carbonio con un'energia di 7,7 MeV: sperimentalmente si trovò un valore di 7,65 MeV. Non c'è bisogno che vi annoi spiegandovi come venissero misurate que-

ste energie: il punto importante è che i due numeri erano notevolmente vicini l'uno all'altro.

Senza questa particolare risonanza del suo nucleo, il carbonio non potrebbe venir fabbricato nelle stelle. E perché il carbonio possa sopravvivere, c'è un'ulteriore richiesta: non deve catturare troppo presto un quarto nucleo di elio, perché altrimenti si trasformerebbe in ossigeno. Quest'ultima reazione, però, *non è* particolarmente efficiente. Ma se il nucleo dell'ossigeno fosse diverso anche solo dell'uno per cento, ci sarebbe una risonanza dell'ossigeno e il carbonio verrebbe trasformato in ossigeno, o in altri elementi della tavola periodica più pesanti ancora, alla stessa velocità con cui viene prodotto.

Queste caratteristiche del carbonio e dell'ossigeno non hanno in sé e per sé nulla di particolarmente notevole. Tutti i nuclei hanno risonanze, e queste specifiche energie hanno più o meno la stessa probabilità di altri valori compresi in un certo intervallo generale. Ma se cercaste di indovinare il numero di un biglietto della lotteria che possa essere con uguale probabilità un qualunque numero fra, diciamo, 1 e 1000, vi sbagliereste in generale almeno di 100; e ci sono solo circa due probabilità su cento che vi avviciniate al numero giusto per meno di 10. La congettura di Hoyle si accostava a tal punto al dato reale che un fisico nucleare avrebbe potuto scommettere cento contro uno che era sbagliata. Queste caratteristiche del carbonio e dell'ossigeno, apparentemente semplici accidenti della fisica nucleare, si rivelano però cruciali per spiegare la presenza del carbonio nelle stelle e nei pianeti e, di conseguenza, per capire il corso seguito dall'evoluzione cosmica.

Le proprietà degli atomi e dei nuclei dipendono da alcuni numeri ancora più fondamentali: le masse delle particelle cosiddette elementari di cui sono costituiti e le intensità delle forze che li tengono uniti insieme. Hoyle pensava che questi numeri non siano veramente universali, ma che possano assumere valori differenti in regioni diverse. La complessità (e forse anche la vita) sarebbe in questo caso confinata in "oasi cosmiche" in cui si verificherebbero condizioni propizie: luoghi dove, per esempio, il carbonio possiede l'inusuale proprietà

che egli aveva identificato. Ma oggi conosciamo ormai abbastanza cose su parti molto remote dell'universo per ritenere fondatamente che le leggi basilari siano le stesse ovunque, o almeno ovunque i nostri telescopi possono arrivare a sondare.

Si tratta allora di una semplice coincidenza, di un fatto bruto, che i nuclei del carbonio abbiano questa speciale caratteristica, anche se le probabilità sembrano essere di 100 a 1? Negli ultimi trenta anni la maggior parte dei cosmologi avrebbe risposto di sì. Ma Hoyle avrebbe potuto aver essenzialmente ragione, solo che non pensava su scale abbastanza grandi. Il nostro *intero universo osservabile* potrebbe essere "un'oasi" in un più grande insieme di altri universi. Anche se non possiamo osservarli e anche se potrebbero benissimo rimanere per sempre inaccessibili, l'esistenza di altri universi è un'aspettativa naturale della cosmologia corrente. Inoltre, molte caratteristiche del nostro universo che sembrerebbero altrimenti elusive e impenetrabili si sistemano da sole una volta che si riconosca questo punto. Uno dei temi principali di questo libro sarà quello di elaborare questo concetto di *multiverso*. Ma prima di avventurarci in ulteriori speculazioni, dobbiamo contemplare le dimensioni e la fabbrica di questo universo che è la nostra casa.

NOTE

1. Si dovrebbe fare eccezione per quegli elementi radioattivi rari che trasmutano spontaneamente: per esempio, l'uranio decade lentamente in piombo. Le stime migliori dell'età della Terra derivano da misurazioni della percentuale di uranio che sopravvive dall'epoca in cui la Terra arrivò a solidificarsi.

2. I nuclei di idrogeno (protoni) possono combinarsi formando nuclei di elio in due modi diversi. Il primo coinvolge reazioni dirette "protone-protone". L'altro (che può funzionare quando sono già presenti alcuni nuclei di elementi più pesanti) è il cosiddetto "ciclo CNO" che utilizza il carbonio (C), l'azoto (N) e l'ossigeno (O) come catalizzatori, ma non ha nessun effetto netto sulle abbondanze relative di questi elementi.

3. Come si dirà nel capitolo 4, un sistema planetario di tipo alquanto inusuale era già stato scoperto nel 1992. La sua stella centrale è molto diver-

sa dal Sole: è una stella di neutroni in rapida rotazione. Un sistema del genere sarebbe una dimora assai poco propizia per la vita.

4. Nel corso della stessa conferenza tenuta alla Royal Society in cui presentava questa sua idea, Carter accennò a un suo argomento "apocalittico" ancor più controverso. Esso vorrebbe stabilire che è poco probabile che la nostra specie possa durare per più di un altro paio di secoli. Questa "dimostrazione" della fine del mondo si fonda su una (discutibile) analogia con il seguente ragionamento. Supponiamo che un'urna contenga N biglietti, numerati da 1 a N, e di non sapere quanto grande sia N: nell'urna potrebbero esserci 10 biglietti come 10 miliardi, o qualsiasi altro numero. Estraete un biglietto a caso e sopra c'è scritto 2452. Potreste allora congetturare che molto probabilmente N sarà un numero vicino a 5000, dato che quello che avete pescato si troverà più o meno a metà fra l'inizio e la fine della serie. Anzi, sareste un po' sorpresi se il vostro numero si trovasse nel primo o nell'ultimo 5 per cento di quelli presenti nell'urna: c'è una probabilità del 90 per cento che non sia così. Dunque, dato che avete pescato 2452, avreste una probabilità del 90 per cento che N non sia né minore di 2600 (altrimenti vi trovereste nell'ultimo 5 per cento) né maggiore di 50.000 (se così fosse avreste pescato un biglietto nel primo 5 per cento). La "dimostrazione" della fine del mondo applica una linea di pensiero similare al "registro" di tutti gli esseri umani mai vissuti o che mai vivranno nel futuro. (Anche se ci sono state decine di migliaia di generazioni passate, il recente aumento della popolazione è stato così drastico che più del 10 per cento degli esseri umani mai vissuti è attualmente vivente.) Carter ne conclude che la popolazione umana debba estinguersi, o almeno declinare drasticamente nel giro di pochi secoli, perché altrimenti ci troveremmo improbabilmente vicini all'inizio del "registro". Questo ragionamento è stato fatto proprio, ed entusiasticamente (se così si può dire) sviluppato, dal filosofo canadese John Leslie e da Richard Gott (le cui ingegnose idee sulle "macchine del tempo" saranno discusse nel capitolo 13). Personalmente attribuisco un certo peso agli argomenti di Carter sulla rarità della vita nel nostro universo, anche se spero che i biologi ci forniscano presto un fondamento scientifico più certo. Ma non posso prendere sul serio la "dimostrazione" apocalittica, per quanto la sua deprimente conclusione non sia, di per sé, implausibile. La mia opinione dipende in parte dal fatto che il valore predeterminato di N nell'urna dei biglietti non sembra costituire un'analogia perfettamente calzante per un numero che dipende da un futuro indeterminato e aperto, e che potrebbe benissimo essere infinito.

5. Esiste un altro isotopo del berillio che contiene tre neutroni invece di quattro e che è stabile. È però l'instabilità dell'isotopo con quattro neutroni a causare il problema.

2

LA SCENA COSMICA: ORIZZONTI CHE SI ESPANDONO

Eppure, è possibile che alcuni corpi, di natura del tutto nuova e la cui scoperta potrebbe in futuro tendere a dischiudere i più importanti segreti nel sistema dell'Universo, possano celarsi sotto l'apparenza di minutissime stelle, che al nostro sguardo apparirebbero del tutto indistinguibili – se non attraverso attente e spesso ripetute osservazioni – da altre dotate di caratteristiche molto meno interessanti.

JOHN HERSCHEL (1820)

Nessun biologo, dopo aver osservato uno e un solo topo, si metterebbe a fare grandi generalizzazioni sul comportamento animale. Gli individui – anche se topi – possono ben avere le loro speciali peculiarità. E nemmeno un fisico si sentirebbe tanto contento se dovesse fondare una teoria sulla base di un unico esperimento irripetibile. Non possiamo, però, controllare direttamente le nostre idee sul nostro universo osservandone altri. Nonostante queste limitazioni la cosmologia scientifica *ha progredito*, ma solo perché il nostro universo nella sua struttura su grande scala è più semplice di quanto avremmo il diritto di aspettarci.

Originariamente "cosmologia" significava "visione del mondo" nel senso più ampio del termine. Oggi questa parola denota, più specificamente, lo studio dell'intero universo osservabile, concepito come un'unica entità.

Il che implica una chiara demarcazione fra la cosmologia (in questo senso) e il resto dell'astronomia, che si occupa de-

gli ingredienti che costituiscono il nostro universo e della sua struttura su scale più fini. Un'analogia terrestre potrà forse aiutare a chiarire il punto. Osservando un oceano da un punto in cui non ci sia terra in vista, si può notare l'esistenza di strutture complesse: onde (a volte quelle più piccole corrono su quelle più grandi), schiuma, e così via. Ma se il vostro sguardo si spinge oltre le onde più lunghe, vedrete un'uniformità globale che si estende per molte e molte miglia fino all'orizzonte. Una parte di oceano abbastanza grande da poter essere considerata "tipica" deve ovviamente estendersi molto più in là della scala delle onde più lunghe. Ma questa dimensione è ancora piccola a confronto della distesa dell'oceano che possiamo vedere; il nostro orizzonte arriva abbastanza lontano da abbracciare molte regioni statisticamente simili l'una all'altra, ciascuna delle quali è abbastanza grande da costituire un buon campione di oceano. Questa vasta uniformità dei paesaggi *marini* non è però una caratteristica dei paesaggi *in generale*. Sulla terraferma, per esempio, una catena montuosa può estendersi fino all'orizzonte con una serie di picchi sempre più alti, o un'unica caratteristica topografica può dominare l'intero panorama.

Il nostro universo osservabile – il volume cioè contenuto nell'"orizzonte" che può essere raggiunto dai telescopi più potenti – assomiglia a un paesaggio marino più che a uno montano. Persino le caratteristiche più cospicue sono piccole se confrontate alla portata dei nostri telescopi. Ha senso, dunque, parlare di proprietà medie, "allisciate" [*smoothed-out*] del nostro universo osservabile. Questa caratteristica, senza la quale la cosmologia non avrebbe potuto fare alcun progresso, sembrava essere, fino a non molto tempo fa, solo una fortunata coincidenza. Solo ora stiamo cominciando a renderci conto del *perché* il nostro universo possieda questa caratteristica semplificatrice.

Ci domanderemo, più avanti in questo libro, se tale metafora non possa essere spinta oltre. L'oceano può sembrare uniforme fino all'orizzonte che possiamo scorgere, solo poche miglia lontano. Ma ciò non significa che esso si estenda all'infinito così, privo di tratti caratteristici. Qualche centinaio di miglia più in là il tempo può essere molto più tempestoso o molto più calmo, e le onde potrebbero apparire completamente diverse. Un migliaio di miglia lontano l'oceano sarà limitato da una costa. Similmente, l'intero universo che possiamo osservare potrebbe essere nient'altro che una chiazza di spazio e di tempo di un multiverso riccamente strutturato. Osserviamo simmetria e semplicità in questa nostra "chiazza" perché queste strutture si inseriscono in scale assai più grandi di quelle che riusciamo a sondare direttamente.

L'orizzonte delle nostre osservazioni si estende fino a dieci miliardi di anni luce, ma abbraccia solo un frammento della realtà fisica – e, per di più, un frammento che potrebbe essere tutt'altro che tipico. Nuovi livelli di complessità potrebbero trovarsi al di là di quest'orizzonte, su scale di gran lunga più grandi. Avanzerò più avanti alcune speculazioni su certe enigmatiche caratteristiche del nostro universo – quelle "coincidenze" che ne fanno una dimora per la vita. Esse potrebbero venir spiegate solo allargando il nostro orizzonte concettuale. Cominciamo, allora, a muoverci in questa progressione verso l'esterno e consideriamo l'universo delle galassie diverse dalla nostra.

La gerarchia delle strutture cosmiche: dalle stelle ai superammassi

La nostra Via Lattea è una tipica rappresentante di innumerevoli altre galassie sparse in tutto il nostro universo. Le stelle e il gas che la costituiscono si trovano principalmente in un disco che ruota intorno a una specie di rigonfiamento centrale, dove le stelle sono più vicine e dove (come vedremo nel capitolo 5) potrebbe starsene in agguato un immenso buco nero. Un segnale luminoso emesso dal centro della Galassia impiegherebbe venticinquemila anni per raggiungere il nostro Sole.

Dal luogo dove ci troviamo le altre stelle del disco sembra-

no concentrarsi in una banda che attraversa il cielo: la Via Lattea. Queste stelle orbitano intorno al centro della Galassia, impiegando più di cento milioni di anni per compiere una rivoluzione completa. Andromeda, che è la galassia più grande vicino alla nostra, dista circa due milioni di anni luce. Come la nostra Galassia, essa contiene gas e stelle di tutte le età.

Perché un cubo gettato a caso nel nostro universo possa contenere in media almeno una galassia, occorrerebbe che avesse uno spigolo di dieci milioni di anni luce. Tuttavia, le galassie non sono distribuite casualmente nello spazio: la maggior parte di esse si trova raggruppata in ammassi, tenuti insieme dalla gravità. Il nostro Gruppo Locale ha un diametro di pochi milioni di anni luce e contiene la Via Lattea e Andromeda, oltre a una ventina di altre galassie più piccole. La gravità sta attirando Andromeda verso di noi a una velocità di circa 100 chilometri al secondo. Fra un cinque miliardi di anni i dischi delle due galassie si schianteranno uno contro l'altro.

Alcuni ammassi contengono molte centinaia di galassie. Il nostro Gruppo Locale si trova ai margini dell'Ammasso della Vergine, il cui centro dista cinquanta milioni di anni luce. Gli ammassi e il gruppo sono a loro volta disposti in strutture più grandi, che formano strutture filamentose che sembrano estendersi su due sole dimensioni. Una delle più cospicue è la cosiddetta "Grande Muraglia", una distesa di file di galassie che si trova a circa 200 milioni di anni luce da noi. Un'altra enorme concentrazione di massa è il Grande Attrattore, che esercita una forza gravitazionale che ci attira, insieme con l'intero Ammasso della Vergine, a una velocità di varie centinaia di chilometri al secondo.

Un universo frattale?

Figure disparate, come quelle di una costa, di una catena montuosa, dei rami di un albero, dei bronchi che si diramano nei nostri polmoni, hanno tutte una caratteristica in comune: ogni loro piccola parte, vista con un forte ingrandimento, ha

una figura che è una specie di simulacro di quella del tutto. Il matematico Benoît Mandelbrot ha coniato il termine *frattale* per descrivere queste configurazioni. Grazie alle sue intuizioni abbiamo potuto apprezzare l'ubiquità di queste strutture nella natura. Perché il nostro universo non potrebbe essere un frattale anche lui, con ammassi di ammassi di ammassi..., all'infinito?

Sappiamo oggi che, di fatto, il nostro universo non è un frattale. Se l'ammassamento gerarchico continuasse indefinitamente verso scale sempre più grandi, per quanto profondamente sondassimo lo spazio, e per quanto grande fosse il volume che campionassimo, le galassie continuerebbero ad avere una distribuzione irregolare nel cielo – staremmo semplicemente campionando scale sempre più grandi della gerarchia. Ma il nostro universo non appare così. Se sondiamo lo spazio più in profondità, osservando un maggior numero di galassie lontane, vediamo un maggior numero di ammassi come quello della Vergine e un maggior numero di strutture simili alla Grande Muraglia. Ma non scopriamo un ulteriore livello di strutture ancora più grandi: la configurazione si va allisciando. Una scatola i cui lati fossero lunghi 500 milioni di anni luce (dimensioni tutto sommato piccole, a confronto di quelle dell'universo osservabile) sarebbe già abbastanza grande per contenere un buon "campione": dovunque si trovasse conterrebbe all'incirca lo stesso numero di galassie, raggruppate in modo statisticamente simile in ammassi, strutture filamentose, e via dicendo. Su larga scala si può dire che il nostro universo osservabile – la regione compresa nel nostro orizzonte – è effettivamente omogeneo. Ci sono molte altre "Grandi Muraglie" ancora più lontane da noi, ma non sembra che ci siano caratteristiche cospicue su scale ancora maggiori.

Da Copernico in poi siamo sempre stati riluttanti a collocarci nel centro del palcoscenico cosmico. Se il luogo in cui ci troviamo è tipico, su grandi scale l'universo (vale a dire tutto ciò che si trova a più di poche centinaia di milioni di anni luce) dovrebbe apparire più o meno lo stesso di quello che potremmo osservare da un'altra galassia.

L'universo in espansione

Gli attuali telescopi rivelano galassie lontane anche dieci miliardi di anni luce. In questa vasta prospettiva cosmologica le galassie non rappresentano altro che "particelle di prova" disperse nello spazio che ci indicano come è distribuito il contenuto dell'universo e come si muove. Quando i cosmologi parlano di "universo in espansione" le prove che possono addurre provengono soprattutto dallo studio del moto delle galassie.

Questa prova risale agli anni Venti. Vari astronomi avevano dato contributi pionieristici, ma la figura dominante fu Edwin Hubble (lo Space Telescope è stato battezzato con il suo nome). Lavorava con il telescopio da 100 pollici dell'osservatorio di Monte Wilson in California (il più potente dell'epoca) e studiava la luce proveniente da molte galassie. Quando questa luce viene fatta passare attraverso un prisma, si scompone in uno spettro di vari colori. Gli spettri delle galassie hanno caratteristiche particolari, dovute ai colori che caratterizzano la luce emessa o assorbita dai vari tipi di atomi (carbonio, sodio e molti altri) di cui le galassie stesse sono costituite. Hubble scoprì che queste caratteristiche erano tutte stiracchiate: le lunghezze d'onda erano più lunghe, spostate verso il rosso, a paragone di quelle misurate in laboratorio o in spettri di stelle e del gas della nostra Galassia. Questo spostamento verso il rosso era maggiore per le galassie che apparivano più deboli e lontane. Hubble affermò che lo spostamento verso il rosso dovesse essere proporzionale alla distanza delle galassie. La causa meglio conosciuta di uno spostamento verso il rosso è il comune effetto Doppler; e se questa fosse effettivamente la ragione degli spostamenti verso il rosso scoperti da Hubble, le galassie dovrebbero allontanarsi da noi con velocità proporzionali alle loro distanze.

Gli sviluppi teorici avevano già adombrato l'idea di un'espansione universale. Nel 1922 il matematico e meteorologo russo Aleksandr Fridman aveva mostrato che un universo illimitato in espansione era coerente con la teoria generale della

relatività di Einstein. Einstein, originariamente, era piuttosto riluttante ad accettare il lavoro di Fridman, inclinando piuttosto per un universo statico, ma la scoperta di Hubble cambiò il suo atteggiamento.[1]

Le prove che Hubble aveva messo insieme erano, allora, tutt'altro che convincenti. Le galassie che aveva studiato erano relativamente vicine a noi, cosicché tutto ciò che poteva inferire direttamente dalle sue osservazioni era che il nostro "superammasso locale" si stava espandendo. Occorreva un vero e proprio atto di fede per credere che la "legge di Hubble" si applicasse a distanze centinaia di volte più grandi, che avrebbero fatto avvicinare la velocità della recessione delle galassie a quella della luce. Ma siccome il lavoro di Fridman era già noto, questa interpretazione fu quanto meno presa sul serio fin dall'inizio.[2]

L'espansione dovrebbe *decelerare*, a causa dell'attrazione gravitazionale che ogni pezzo di materia esercita su ogni altra cosa. Se la densità fosse sufficientemente bassa, la decelerazione sarebbe lieve, e l'espansione non si arresterebbe mai. Il nostro universo sarebbe allora infinito e nello spazio e nel tempo. Ma un universo più denso finirebbe con lo smettere di espandersi e collasserebbe; anche se uniforme (omogeneo) e illimitato, sarebbe però chiuso e finito sia in contenuto che in durata.

Ma negli anni Trenta – e per molti decenni a venire – rimase poco chiaro quanto bene tali universi su vasta scala potessero venire descritti da soluzioni semplici delle equazioni di Einstein; e non c'era modo di distinguere fra la versione cosiddetta "aperta" e quella "chiusa".

La legge di Hubble si estende ora fino a galassie lontanissime, così distanti che si allontanano a più del novanta per cento della velocità della luce. Quei semplici "universi modello" si sono rivelati, più di sessanta anni dopo, straordinariamente realistici: molto più importanti per il nostro universo reale di quanto Fridman e altri pionieri come lui avessero mai osato sperare.

Sembrerebbe, dunque, che viviamo in un universo in

espansione, che si allarga fino a distanze di dieci miliardi di anni luce, in cui gli oggetti distanti si vanno sempre più allontanando con il passare del tempo.[3] Osservatori collocati in una qualunque altra galassia registrerebbero anch'essi un'espansione dello stesso tipo: tutto apparirebbe allontanarsi da loro. Non c'è, dunque, nulla di speciale nel posto che ha la nostra Galassia. Se il luogo che occupiamo nello spazio è tipico e casuale, casuale però non è il momento nel *tempo* in cui stiamo osservando; e perché sia così si chiarirà meglio nel seguito.

Luce stanca?

L'allontanamento delle galassie lontane suggerisce ovviamente che esse emersero da un qualche tipo di "inizio", dieci o venti miliardi di anni fa, quando ogni cosa avrebbe dovuto trovarsi stipata insieme. Hubble fu, almeno inizialmente, di una straordinaria apertura mentale sul fatto che la sua legge relativa agli spostamenti verso il rosso implicasse un'espansione reale. La luce, provenendo da distanze così enormi, non avrebbe potuto invece "stancarsi" e farsi così più rossa, anche se l'universo fosse in realtà statico? Ancora negli anni Settanta alcuni fisici parigini difendevano questa teoria dei *photons fatigués*, e l'idea torna a far capolino di quando in quando. Vale dunque la pena di sottolineare che la "luce stanca" è stata scartata per motivi specifici e non per una forma di riluttanza (magari preconcetta) a contemplare effetti fondamentalmente nuovi.

La luce è, fisicamente parlando, un'onda di energia elettromagnetica che viaggia nello spazio. Le lunghezze d'onda dipendono dal colore: sono più corte per il viola e il blu, e più lunghe per il giallo e il rosso. Le lunghezze d'onda di tutti i tipi di luce proveniente da una galassia lontana sono tutte aumentate di uno stesso fattore. Ciò corrisponde esattamente a quello che ci aspetteremmo in un universo in espansione – le lunghezze d'onda, come nel normale effetto Doppler, vengono tutte allungate nello stesso rapporto. Ma un meccanismo

capace di "stancare" la luce, in generale non produrrebbe un effetto siffatto. Per di più, ogni effetto che facesse perdere energia alla luce a causa di ripetute interazioni dovute a ipotetiche particelle, farebbe sfuocare le immagini degli oggetti lontani, e anche questo va contro alle osservazioni.

Disponiamo ora di un altro test. Un orologio che si allontani da noi sembra rallentare: se emettesse un bip-bip a intervalli regolari, i segnali emessi per ultimi dovrebbero fare più strada e gli intervalli fra una ricezione e un'altra andrebbero allungandosi. Questo rallentamento è direttamente correlato allo spostamento verso il rosso. Le "creste d'onda" successive della luce proveniente da un qualsiasi atomo o molecola sono dovute alle loro vibrazioni. Ciò costituisce essenzialmente un orologio microscopico: le creste ci arrivano più lentamente quando la fonte si allontana, e le lunghezze d'onda vengono stiracchiate. Ora, la natura ci ha fornito orologi abbastanza luminosi da poter essere visti anche in galassie lontane: le supernove. Un tipo di supernova (detto, senza troppo sforzo di fantasia, di "tipo 1"), che segnala la morte di una stella nel corso di una violenta esplosione termonucleare, si accende e si spegne secondo certe modalità standard. Le supernove di tipo 1 molto lontane sembrano di fatto infiammarsi e svanire più lentamente di quelle vicine. Il rallentamento è esattamente quello che ci aspetteremmo se si stessero allontanando, arrossandosi a causa dell'effetto Doppler, ma non avrebbe alcuna spiegazione naturale in un universo statico.

In effetti, un universo statico comporterebbe paradossi ben peggiori di quelli di una qualunque teoria del Big Bang. Le stelle non hanno riserve di energia infinite: nascono, si evolvono, e alla fine terminano il loro combustibile nucleare. E così fanno le galassie che sono, essenzialmente, aggregati di stelle. L'età stimata della Via Lattea e delle altre galassie – circa dieci miliardi di anni – è del tutto compatibile con la concezione che il nostro universo abbia cominciato a espandersi più o meno altrettanto tempo fa. Ma se il nostro universo fosse statico tutte le galassie si dovrebbero essere misteriosamente accese sincronicamente 10 miliardi di anni fa. Un universo

che non si espande – persino un universo simile a quello proposto da Einstein prima di venire a conoscenza del lavoro di Hubble e di cui riparleremo nel capitolo 8 – implica severe difficoltà concettuali.[4]

Un universo che si evolve?

Gli astronomi possono studiare parti dello spazio da cui la luce è scaturita molto tempo fa. Se vivessimo in un universo scompigliatamente irregolare queste remote regioni potrebbero non avere alcuna somiglianza con la nostra. Ma poiché il nostro universo, o almeno la parte che ne possiamo vedere, possiede un'uniformità su larga scala che lo rende più simile a un paesaggio marino che a un paesaggio montuoso, possiamo inferirne che tutte le sue parti si sono evolute nello stesso modo e hanno storie simili. Così, quando osserviamo una regione che si trova, poniamo, a tre miliardi di anni luce da noi, all'ingrosso le sue caratteristiche (come appaiono le galassie, il modo in cui si ammassano, e così via) assomiglieranno a come la nostra zona appariva tre miliardi di anni fa.

Ma le galassie, nel passato, erano per davvero più vicine, più addensate? E le galassie lontane appaiono davvero diverse, come dovremmo aspettarci se esse erano, in media, più giovani quando emisero la luce che oggi vediamo? I primi dati raccolti da Edwin Hubble non potevano fornire una risposta. Si tratta di domande importanti perché non è affatto detto che si debba necessariamente rispondere di sì: un universo in espansione non è necessariamente un universo che si evolve. Fred Hoyle, insieme a Hermann Bondi e Thomas Gold, insistette con forza su questo punto. Bondi e Gold erano due fisici teorici che si erano rifugiati a Cambridge, profughi dall'Austria occupata dai nazisti. Bondi, che era primariamente un matematico applicato, contribuì con influenti idee all'astronomia e alla teoria della relatività. L'esperienza di Gold era più eclettica: la sua carriera accademica era cominciata con una tesi sull'udito e sulla fisiologia dell'orecchio interno e passò poi a sviluppare le sue intuizioni fisiche in molte altre aree (fra cui la teoria delle stelle di neutroni, come vedremo nel capitolo 4).

Bondi, Gold e Hoyle congetturarono che l'universo in cui viviamo potesse trovarsi in uno "stato stazionario", in cui la continua creazione di nuova materia e di nuove galassie mantenesse immutata la scena cosmica, nonostante l'espansione globale. Le singole galassie continuerebbero a evolversi; ma, invecchiando, si disperderebbero in lungo e in largo e nuove galassie più giovani prenderebbero il loro posto nei vuoti che si andrebbero formando fra di loro. Il tasso di creazione di materia risultava così basso da essere del tutto irrilevabile dall'osservazione – un atomo al secolo per chilometro cubo – ma molti trovavano che si trattasse di un'implausibile concezione *ad hoc*. Hoyle rispose a questa obiezione sviluppando una teoria specifica su come potessero occasionalmente materializzarsi nuovi atomi; comunque – sosteneva – la creazione di ogni cosa in un colpo solo rappresentava un distacco ancora più grande rispetto alla fisica tradizionale. Bondi, Gold e Hoyle arrivarono a ideare la concezione dello stato stazionario nel 1948, dopo aver visto il film *The Death of the Night* (*La morte della notte*), la cui conclusione ricapitolava la scena iniziale.

La teoria dello stato stazionario fornì uno stimolo costruttivo per oltre quindici anni. Se prevalesse uno stato stazionario, le regioni lontane, nonostante noi le vediamo come erano molto tempo fa, dovrebbero statisticamente apparire *esattamente* come le regioni vicine. Si tratta di una predizione molto specifica: se le galassie remote in media ci apparissero diverse, non potremmo vivere in un universo stazionario.

La battaglia (persa) per lo stato stazionario

Anche se il nostro universo si stesse evolvendo, i cambiamenti sarebbero così lenti che si manifesterebbero solo nel corso di miliardi di anni. Per individuare una tendenza evolu-

tiva (o per controllare se l'universo si trovi veramente in uno stato stazionario) bisogna sondare galassie tanto lontane la cui luce sia scaturita vari miliardi di anni fa. Sforzi in questa direzione iniziarono già negli anni Cinquanta, utilizzando il telescopio di Monte Palomar in California che, col suo specchio di 200 pollici (5 metri circa) di diametro, era di gran lunga il più grande del mondo. I risultati erano inconcludenti. Le galassie normali con uno spostamento verso il rosso sufficientemente elevato non erano abbastanza luminose da impressionare le lastre fotografiche, persino con un collettore di luce così potente come un telescopio da 200 pollici.

Negli anni Cinquanta i migliori telescopi ottici del mondo erano concentrati in America e particolarmente in California. Questo allontanamento dall'Europa si era verificato per ragioni sia climatiche sia finanziarie. Non ha evidentemente molto senso costruire complicati telescopi in posti a bassa quota e per di più esposti al clima delle isole britanniche. Ciò nonostante, la prima scoperta importante in cosmologia, dopo quella di Hubble dell'espansione cosmica, venne da una tecnica del tutto diversa: la radioastronomia. Le onde radio provenienti dallo spazio possono attraversare le nuvole, per cui l'Europa non aveva nessun *handicap* climatico in questa nuova scienza.

Già all'inizio degli anni Cinquanta, quando le tecniche erano ancora primitive, i radioastronomi inglesi e australiani avevano scoperto rumori radio particolarmente intensi quando le loro antenne erano puntate in certe direzioni. Alcune di queste radiosorgenti cosmiche poterono essere rapidamente identificate. Per esempio, una forte radiazione emanava dal centro della Galassia; un'altra sorgente molto forte era situata nella Nebulosa del Granchio, i resti dell'esplosione di una supernova cui avevano assistito gli astronomi dell'Estremo Oriente nel 1054 d.C. (Ne abbiamo parlato nel capitolo 1.)

Nel 1954 due astronomi californiani, Walter Baade e Rudolf Minkowski, scoprirono che la radiosorgente, seconda per intensità in tutto il cielo, era una galassia più remota dell'usuale. La sua emissione radio era così intensa che sarebbe

stata raccolta dai radiotelescopi anche se si fosse trovata svariate volte più lontana; ma la sua luce visibile in tal caso sarebbe risultata troppo debole per poter essere registrata. La scoperta di Baade e Minkowski indicava che le nuove tecniche della radioastronomia permettevano di sondare più nel profondo dell'universo primordiale: i radiotelescopi potevano raccogliere l'emissione proveniente da alcune galassie inusualmente "attive" (si ritiene oggi – vedi capitolo 5 – che ospitino nei loro centri massicci buchi neri), anche se queste si trovavano troppo lontano per poter essere osservate con telescopi ottici.

I radiotelescopi sono sensibili in modo stupefacente a segnali molto deboli. Martin Ryle, un pioniere di questo campo, lo illustrava in modo molto carino. Nel suo osservatorio, situato appena fuori Cambridge, c'erano giorni di visita aperta al pubblico. Ai visitatori si chiedeva di prendere un foglietto di carta da una risma che era lì a disposizione. Sopra c'era scritto: "Per raccogliere questo foglio avete speso più energia di quanta ne sia mai stata raccolta da tutti i radiotelescopi del mondo da quando sono stati costruiti".

Un problema che si poneva in quei primi giorni della radioastronomia era riuscire a determinare le direzioni esatte da cui provenivano questi cosmici "disturbi radio". Ryle inventò una tecnica che migliorò il problema, poiché essa lo metteva in grado di esaminare il cielo settentrionale e di localizzare varie centinaia di sorgenti. Utilizzò molto ingegnosamente i dati che aveva raccolto per concluderne che il nostro universo si stava effettivamente evolvendo e che non poteva trovarsi in uno stato stazionario.

Ryle non conosceva le distanze delle sue radiosorgenti (la maggior parte di esse non avevano controparti visibili, e di conseguenza gli astronomi ottici non potevano misurarne lo spostamento verso il rosso), ma suppose che, in media, le sorgenti deboli fossero tanto più lontane di quelle che emettevano segnali più intensi quanto più debole era il loro segnale. Contò quante erano le varie intensità apparenti e sorprendentemente trovò che, a paragone del numero di quelle più forti e

più vicine, c'era un eccesso di radiosorgenti di intensità apparente debole – vale a dire molte sorgenti che si trovavano principalmente a grande distanza. Era come se ci trovassimo nel mezzo di una sfera enorme, con un raggio di molti miliardi di anni luce, e la concentrazione di radiosorgenti fosse maggiore in prossimità della superficie della sfera che vicino al suo centro. Conclusione che sembrava incompatibile con l'idea di un universo stazionario, in cui le sorgenti, per ipotesi, appartengono a popolazioni simili in ogni momento di tempo e, dunque, a ogni distanza. Era però un risultato del tutto compatibile con un universo in evoluzione. Ryle suppose che le galassie fossero più inclini a subire misteriose esplosioni che generavano intense emissioni di onde radio nella loro gioventù, svariati miliardi di anni fa. Se, maturando, le galassie "si fossero andate tranquillizzando", poche fra quelle più vicine a noi sarebbero state rilevate come radiosorgenti.

Ryle avanzò i suoi argomenti negli anni Cinquanta, provocando una rumorosa (e spesso tempestosa) controversia che durò vari anni. Quando ne venni a conoscenza, all'inizio degli anni Sessanta, le idee di Ryle mi sembravano ingegnose e cogenti. La perdurante opposizione degli "uomini di stato-stazionario" mi lasciava perplesso. Solo in seguito venni a sapere qual era il contesto della disputa. All'inizio degli anni Cinquanta Ryle era stato, in altri campi, altrettanto dogmatico dei suoi avversari attuali, anche se si muoveva su un terreno alquanto infido.

Per esempio, quando vennero scoperte le prime radiosorgenti, Ryle pensò che si trattasse di "radio-stelle" interne alla nostra Galassia. Non sembrava che si concentrassero intorno al piano della Via Lattea; ma questo avrebbe potuto significare che erano *molto* vicine (astronomicamente parlando): se le sorgenti rilevabili fossero state tutte più vicine dello *spessore* del disco galattico (poche centinaia di anni luce), sarebbero apparse come distribuite uniformemente nel cielo. Gold e gli altri gli controbattevano che le sorgenti non erano concentrate nella Via Lattea per il semplice motivo che non avevano nulla da spartire con la nostra Galassia, e che si trovavano

molto più lontane. Ryle inizialmente resistette a queste proposte con grande fervore, anche se poi le grandi distanze di questi oggetti assunsero un ruolo centrale nelle sue argomentazioni cosmologiche.

Un secondo motivo che induceva allo scetticismo era che le prime radiorassegne di Ryle si erano rivelate piuttosto viziate. Producevano infatti una mappa così confusa del "radiocielo" che a volte due o più sorgenti distinte venivano contate come se fossero una sola. Nel 1958, però, quando Ryle presentò le sue idee a sostegno di un universo in evoluzione in un'importante conferenza alla Royal Society, i problemi più seri erano stati risolti: la sostanza di tutto quello che disse in quell'occasione ha superato la prova del tempo.

La teoria dello stato stazionario metteva in discussione alcune credenze care a molti fisici e astronomi e forniva predizioni molto specifiche che stimolavano gli osservatori a tentare di confutarla. Gli inventori della teoria, un trio composito e inventivo che nelle controversie ci sguazzava, erano pubblicisti molto efficaci. Hoyle, in particolare, era un brillante divulgatore; e molti cosmologi più giovani (io fra questi) devono il loro slancio iniziale ai suoi libri e alle sue trasmissioni televisive. La battaglia fra i sostenitori di un universo stazionario e quelli di un universo in evoluzione arrivò così fino a toccare il grande pubblico. Almeno in Gran Bretagna: le voci di Bondi, Gold e Hoyle non riuscivano ad attraversare l'Atlantico e la loro teoria non fu mai presa sul serio in America. Ma erano i pionieri della radioastronomia britannici e australiani (molti dei quali si erano fatti le ossa lavorando sui radar durante la Seconda Guerra Mondiale) quelli meglio piazzati per condurre le esplorazioni radio cruciali.

Ryle, chiaramente, voleva che le sue radio osservazioni avessero un impatto decisivo sulla cosmologia, e lo potevano avere solo confutando la teoria dello stato stazionario. Aveva investito anni di fatiche nel progettare e costruire nuovi strumenti, oltre che nella raccolta dei dati vera e propria. Al giorno d'oggi nessuno sarebbe in grado di padroneggiare tutte le tecniche necessarie in un'impresa del genere, ma Ryle era un

esemplare eccezionale di quei pionieri della radioastronomia che concepivano e costruivano attrezzature nuove, traendo loro stessi deduzioni di tipo fondamentale dai dati che raccoglievano. Nessuno riuscirebbe a perseverare in un progetto così arduo senza una forte (e forse eccessiva) fiducia nella sua importanza potenziale, decisiva. I programmi di ricerca così impegnativi e prolungati tendono a essere guidati proprio da personalità di questo genere.

Nonostante le argomentazioni cogenti (o, almeno, retrospettivamente tali) che Ryle avanzò nel 1958, ci vollero parecchi anni perché la controversia si spegnesse. Le sorgenti radio rimanevano un enigma. Si pensava che fossero galassie di tipo speciale, ma gli astronomi ottici riuscivano a vedere solo poche "radio galassie" relativamente vicine. Ryle ne deduceva che le altre fossero simili a queste, ma che si trovassero al di là della portata dei telescopi ottici. Non c'era nessuna prova che corroborasse quelle presunte immense distanze: nessuna misura di spostamenti verso il rosso, per esempio, o associazioni con galassie lontane. E nessuno aveva ancora la minima idea di come una galassia potesse convogliare in onde radio una potenza così immensa.

Quelle misteriose sorgenti, dopotutto, non avrebbero potuto forse trovarsi all'interno della popolazione della Via Lattea, come Ryle stesso aveva ritenuto fino al 1954? In questo caso, i conteggi delle radiosorgenti avrebbero sondato la "geografia" della nostra Galassia, e non avrebbero avuto rilevanza alcuna per la cosmologia. Il principale sostenitore di questa "via di fuga" fu Dennis Sciama, che per mia grande fortuna divenne il mio supervisore di ricerca quando cominciai a lavorare come studente ricercatore nel 1964. All'epoca si autodescriveva (probabilmente a ragione) come l'ultimo credente nella teoria dello stato stazionario, eccezion fatta per il trio che l'aveva inventata. Ma persino Sciama dovette capitolare di fronte alle nuove evidenze fornite dall'astronomia ottica. Alcune delle sorgenti di Ryle si rivelarono alla fine abbastanza luminose da poter essere osservate dagli astronomi tradizionali. Erano i *quasar*, galassie con cento miliardi di stelle, la cui luce è come oscurata dalla radiazione che proviene dai loro centri. (Si ritiene oggi che ospitino immensi buchi neri.) Questi quasar presentavano spostamenti verso il rosso molto accentuati e uno dei miei primi progetti di ricerca fu quello di vedere che cosa si potesse dedurre da questi spostamenti. Il risultato fu che i quasar ad alti spostamenti verso il rosso erano molto più comuni di quelli vicini, il che corroborava le congetture di Ryle e bastò a convincere Sciama che Ryle avesse sostanzialmente ragione.

I conteggi delle radiosorgenti hanno oggi solo un interesse storico, dato che sono stati da tempo soppiantati da tecniche più informative e meno ambigue. Furono, però, il primo vero "test cosmologico". Quell'episodio mi diede l'opportunità, quando ero ancora studente a Cambridge, di seguire da vicino una controversia scientifica e di apprezzare gli atteggiamenti contrastanti che si manifestano in genere nei dibattiti cosmologici. Sciama era un adepto della teoria dello stato stazionario. Per lui, come per i suoi inventori, essa aveva un profondo interesse filosofico – l'universo era sempre esistito, sarebbe esistito per sempre in un unico stato autoconsistente. Quando cominciarono a venir fuori evidenze che mettevano in discussione questa teoria, Sciama si mise a cercare una scappatoia (e persino una che non aveva molto l'aria di funzionare), un po' come un avvocato difensore si attacca a ogni cavillo per respingere i capi d'accusa.

Quando viene scoperto un fenomeno nuovo e i dati sono ancora pochi, possono farsi concorrenza varie teorie che puntano a spiegarlo. Un loro più attento esame può suggerire nuovi modi di metterne alla prova alcune; può rivelare incoerenze interne di altre. Questi sforzi restringono il campo delle teorie sostenibili e a volte riescono persino a identificare una "favorita". Alcuni teorici, come Sciama, sono fautori entusiasti di una certa ipotesi: per loro questa dedizione a una causa rappresenta una motivazione necessaria. Altri dividono invece le loro puntate, e possono in effetti investigare due o più ipotesi (che si escludono a vicenda) in parallelo: per costoro la ricerca di una comprensione più profonda è una motivazione

sufficiente. Hoyle, l'astrofisico più creativo e originale della sua generazione, apparteneva senz'altro a questa seconda categoria. Sosteneva la teoria dello stato stazionario, ma ciò non gli impedì di contribuire con idee chiave allo sviluppo di teorie rivali.

I quasar, ieri e oggi

Nei primi tempi della radioastronomia era difficile localizzare le sorgenti con un'accuratezza tale da essere sicuri quali fossero gli oggetti visibili che generavano l'emissione radio. L'unica eccezione possibile si verificava quando in quella stessa direzione era presente un qualche oggetto luminoso e con caratteristiche chiaramente peculiari, come la Nebulosa del Granchio. Nel 1963 si fece un grosso passo in avanti, quando l'australiano Cyril Hazard e i suoi colleghi riuscirono a indicare la posizione di una particolare sorgente con una precisione di pochi secondi d'arco. Avevano puntato il radiotelescopio di Parkes verso l'oggetto 3C273 (così chiamato perché era il numero 273 del terzo catalogo di Cambridge di radiosorgenti compilato da Ryle) mentre la Luna si muoveva attraverso quella parte del cielo. La sorgente "scomparve" quando il bordo della Luna le passò di fronte: gli astronomi australiani annotarono il momento esatto (e l'esatta posizione della Luna). Il solo oggetto visibile prossimo alla posizione corretta era un oggetto simile a una stella piuttosto debole (13ª magnitudine).

Cyril Hazard non aveva accesso a un telescopio ottico abbastanza potente, così convinse Maarten Schmidt, un astronomo olandese che lavorava in California, a rilevare lo spettro ottico di 3C273 con il telescopio da 200 pollici di Monte Palomar. Schmidt scoprì notevoli caratteristiche dello spettro, che però non riuscì immediatamente a interpretare – l'oggetto non era sicuramente una stella. La cosa gli rimase oscura fin quando, di colpo, non si accorse che lo spettro aveva la struttura che ci si aspetterebbe dall'idrogeno, salvo che era spostata su lunghezze d'onda lunghe il 15 per cento in più di quello

che avrebbero dovuto essere. Uno spostamento di questo genere era stato osservato fino a quel momento solo in galassie molto remote e a mal fatica discernibili. Ma 3C273 – che appariva puntiforme ed era quindi senza dubbio più piccolo di una galassia – era molto *più luminoso* di quanto avrebbe potuto essere una *intera* galassia dotata di uno spostamento verso il rosso così sostanzioso.

Rimosso questo blocco intellettuale, vari altri spettri di sorgenti simili a questa, che fino ad allora erano rimasti misteriosi, cominciarono ad avere un senso. Venne scoperta una nuova classe di oggetti che sulle lastre fotografiche assomigliavano a comuni stelle, ma i cui spettri mostravano forti spostamenti verso il rosso. Divennero noti come "oggetti quasi stellari" (*quasi-stellar objects*), o *quasar*. Una volta noti i loro spostamenti verso il rosso, se ne potevano inferire le distanze sulla base della legge di Hubble. Per apparire così brillanti a distanze tanto grandi, i quasar dovrebbero superare in luminosità galassie intere, anche se ricavano la loro energia da un qualcosa che è più piccolo del nostro sistema solare. Sono anche soggetti a esplosioni, di una potenza equivalente all'accendersi di diecimila galassie come la nostra in un solo giorno. Su come ciò accada, si sa poco ancor oggi.

Nuove leggi fisiche?

Quando vennero scoperti, i quasar sfidavano certamente la comprensione. Ci vollero vari anni perché ci si rendesse conto che sono situati nel centro di galassie e che erano da mettersi in correlazione con le radio galassie delle cui notevolissime proprietà si era già reso conto Ryle. In quei primi tempi alcuni ricercatori arrivarono a dubitare se i quasar potessero venir inquadrati nel contesto della fisica tradizionale. Forse – pensavano – era all'opera una "nuova fisica": o nel senso che ci potesse essere una spiegazione diversa degli spostamenti verso il rosso, di modo che i quasar avrebbero potuto essere più vicini (e dunque non così potenti); o nel senso che ci potesse

essere un meccanismo di produzione dell'energia più efficace di quelli conosciuti. All'epoca questa era una preoccupazione del tutto realistica e scatenò un dibattito piuttosto vivace.

In linea di principio è del tutto concepibile che in questi fenomeni cosmici entri in gioco qualche legge di natura fondamentalmente nuova. In fin dei conti, un fisico che lavorasse in un laboratorio galleggiante nello spazio, probabilmente non arriverebbe mai a scoprire la gravità, perché si tratta di una forza debolissima a meno che non sia presente una massa molto grande, come quella della Terra. Potrebbe quindi darsi che esistano altri effetti che, pur se insignificanti persino sulla scala del sistema solare, hanno un'importanza cruciale nei centri delle galassie o a livello cosmologico.

A sostegno di questa causa venivano addotte varie osservazioni piuttosto enigmatiche. Per esempio, si affermava che i quasar si trovavano frequentemente vicino a galassie con un modesto spostamento verso il rosso e che ciò accadeva troppo spesso per essere una mera coincidenza, ma doveva esistere un qualche legame fisico. Ma è anche troppo facile vedere configurazioni significative in dati casuali – configurazioni che possono sembrare improbabili. Il test cruciale è se un'ipotesi ha o no potere predittivo e se si applica non solo agli oggetti in cui è stato notato per la prima volta il preteso effetto, ma anche a nuovi casi. Per la maggior parte le anomalie apparenti si attenuarono (e in alcuni casi scomparvero) via via che nuovi dati si andavano accumulando.

Ma spesso vengono a galla nuove peculiarità che rimpiazzano le precedenti. Con il proseguire degli studi, è destino che vengano scoperti *nuovi e nuovi* effetti sorprendenti. A meno che questi effetti non possano essere incorporati quasi tutti in un'unica teoria, il loro peso, a vantaggio di un punto di vista non ortodosso, non si somma. Inoltre, quando si dice che c'è solo, per esempio, una probabilità su duecento di ottenere una certa correlazione per pura coincidenza, non dovremmo ciecamente accettare affermazioni del genere senza fare un'abbondante "tara" che tenga conto di tutti gli altri effetti similari che avrebbero potuto essere scoperti ma che non

lo sono stati (le affermazioni sulla percezione extrasensoriale – telepatia e simili – spesso derivano dal non tener conto di questo punto).

Nel 1970 si tenne un convegno piuttosto vivace dedicato a queste problematiche; era stato organizzato (un po' incongruamente) nella Città del Vaticano, sotto gli auspici della Pontificia Accademia delle Scienze. Alcuni dei partecipanti mostravano immagini di galassie con spostamenti verso il rosso molto diversi, pretendendo che esse fossero fisicamente collegate e che non fossero semplici sovrapposizioni di oggetti in primo piano e sullo sfondo. Di conseguenza gli spostamenti verso il rosso avrebbero dovuto essere "anomali". "Non capisco la logica di chi rifiuta dei dati perché sembrano incredibili", commentò Fred Hoyle. "Non riesco a trovare *migliore* ragione per farlo", gli ribatté Lyman Spitzer, eminente teorico di Princeton (e più tradizionalista di Hoyle).

Questo dibattito sul problema se i quasar fossero vicini o lontani fa venire in mente una controversia astronomica di duecento anni prima, a proposito della realtà delle stelle binarie. Erano noti molti esempi di coppie di stelle che si vedevano molto vicine nel cielo e John Michell (che ritroveremo nel capitolo 5) mostrò statisticamente che c'erano *troppe* coppie del genere perché si trattasse di un puro caso di sovrapposizione di stelle in primo piano e stelle sullo sfondo. Di conseguenza, sosteneva, queste stelle dovevano essere fisicamente associate "o per la forza di gravità – o per qualche altra legge o disposizione emanata dal Creatore".

William Herschel non era d'accordo. Credeva (a torto, come oggi sappiamo) che tutte le stelle avessero la stessa luminosità. Poiché le stelle di tutti questi pretesi sistemi binari erano in genere di luminosità diversa, ne concludeva che la più debole dovesse essere molto più lontana della seconda, cosicché non potevano orbitare l'una intorno all'altra. Herschel ci mise 36 anni a cambiare idea. C'è un parallelo fra questo dibattito e la controversia della fine dei nostri anni Sessanta che divideva chi credeva che gli spostamenti verso il rosso fossero

una misura reale della distanza dei quasar e chi invece, sulla base di evidenze statistiche, affermava il contrario.

Questo dibattito sui quasar mise in luce i contrastanti atteggiamenti di varie personalità scientifiche. Molti si sarebbero sentiti veramente disturbati se gli spostamenti verso il rosso anomali fossero esistiti per davvero, perché ciò avrebbe significato che eravamo ben lontani dall'avere un'immagine definitiva del nostro universo. D'altro canto, coloro che sposavano le concezioni più radicali si imbaldanzivano all'idea che osservazioni astronomiche potessero rivelare una fisica fondamentalmente nuova. I filosofi della scienza si stupirebbero nel sapere quanti astronomi erano smaniosi di unirsi alla banda rivoluzionaria che tentava di assaltare la diligenza.

Il mio atteggiamento, apparentemente non condiviso da molti, era quello di un conservatore *riluttante*. Mi sarebbe piaciuto che i radicali avessero avuto ragione, ma i loro argomenti mi lasciavano scettico e dubitavo assai che ci fosse un giustificato bisogno di una nuova fisica. Molti aspetti dei quasar erano problematici (alcuni lo sono ancor oggi!), ma si potrebbe dire lo stesso per molte cose che sono state studiate assai più intensivamente e per molto più tempo. Non è chiaro, a tutt'oggi, perché il numero delle macchie solari vada su e giù seguendo un ciclo di dodici anni; fenomeni di laboratorio come la superconduttività continuano a turbare i fisici. Ma nessuno invoca seriamente una "nuova fisica" per spiegare questi fenomeni. L'astrofisica è un campo che pone molti problemi ai suoi praticanti, e ci sarebbe da meravigliarsi se non ci fossero ancora molti misteri. Anche quando è sembrato che i progressi rallentassero, non si è mai arrivati a una *impasse* tale da giustificare l'abbandono della fisica "convenzionale", le cui ricche conseguenze sono ben lungi dall'essere esaurite.

È solo nei primissimi stadi del Big Bang, o nel profondo dei buchi neri, che dobbiamo confrontarci con una fisica che è "nuova", nel senso che non può essere controllata sperimentalmente, nemmeno osservando oggetti astronomici estremi come i quasar o le supernove.

Quando le galassie erano giovani

I cosmologi dipendono dalle osservazioni più che dagli esperimenti. Assomigliano ai paleontologi o ai geologi, che cercano di inferire come si sia evoluta la nostra Terra – e le creature che la abitano. I cosmologi studiano "fossili" del passato (vecchie stelle, elementi chimici sintetizzati quando la Galassia era ancora giovane, e così via). Ma hanno un vantaggio rispetto a chi si occupa di altre scienze "storiche": puntando i loro telescopi verso oggetti lontani, possono completare le testimonianze "fossili" *osservando* letteralmente il passato.

Alcuni critici – di fede creazionista – deridono il darwinismo. "È solo una teoria", dicono. Intendono cioè che esso è fondato su inferenze indirette: e in effetti lo è, anche se queste inferenze si incatenano l'una con l'altra formando una teoria eccezionalmente robusta. Ma i cosmologi possono *vedere* effettivamente l'evoluzione di cui ci parlano – le galassie lontane, la cui luce è scaturita vari miliardi di anni fa, appaiono chiaramente diverse dalle loro corrispettive qui nei dintorni. Non si tratta, ovviamente, di una "macchina del tempo", di quelle che portano ai paradossi di cui discuteremo nel capitolo 13 (del tipo "ammazzare vostra nonna quando era ancora nella culla", e simili). Non stiamo sondando la storia della nostra regione locale; ma stiamo vedendo istantanee di molte galassie lontane che, almeno statisticamente, dovrebbero assomigliare a come erano la nostra Via Lattea, Andromeda e gli altri sistemi dei dintorni molti miliardi di anni fa.

Si possono ottenere immagini chiare di queste galassie grazie allo Hubble Space Telescope. La concorrenza per accedere a questo telescopio spaziale è così serrata che anche a quelli che ci riescono vengono assegnate solo poche ore di osservazione. Al direttore del progetto, Robert Williams, è tuttavia concessa *ex officio* una quota extra, da usare a sua discrezione. Cogliendo questa invidiabile opportunità, lui decise di puntare il telescopio per dieci giorni interi verso un'unica, piccola zona del cielo. Questa lunga esposizione ha prodotto le immagini più chiare e più dettagliate dell'universo lontano che si

fossero mai viste. Nel cielo si addensano deboli galassie; sembrano così piccole che sarebbero a mal fatica percepibili come confuse macchioline in una foto presa da terra. Questi oggetti hanno tutta una varietà di forme e sono miliardi di volte più deboli di qualunque stella che possiamo vedere a occhio nudo. Ma ciascuno di essi è un'intera galassia, che si estende per molte migliaia di anni luce, e che appare così piccola e debole solo a causa della sua enorme distanza.

Ciò che più affascina in queste immagini non sono tanto queste distanze da *Guinness dei primati*, ma *l'enorme lasso di tempo* che ci separa da queste remote galassie. Appaiono diverse dalle loro corrispettive dei nostri dintorni perché le stiamo vedendo quando si erano formate solo di recente; non si erano ancora assestate in quelle forme da "girandole" in rotazione costante che hanno le galassie a spirale vicine a noi e che si possono ammirare in quasi tutti i libri di astronomia. Alcune consistono soprattutto di gas diffuso e risplendente, che non si è ancora frammentato in singole "gocce" destinate a diventare stelle. Appaiono intrinsecamente più azzurre delle galassie attuali (naturalmente dopo aver corretto lo spostamento verso il rosso), perché allora, quando la luce partì da quelle galassie lontane, le grandi stelle azzurre – ai nostri giorni ormai tutte morte – brillavano ancora, trasmutando l'idrogeno primordiale in altri elementi della tavola periodica.

Lo Space Telescope ci sta mostrando a cosa poteva assomigliare la Via Lattea quando le sue prime stelle splendevano con tutta la loro lucentezza. Non c'era allora una chimica complessa, non c'erano pianeti, non c'era – presumibilmente – nemmeno la vita. Ma queste immagini meravigliose ci offrono una nuova visione di quell'era remota in cui cominciavano a venire gettati i blocchi costitutivi del nostro sistema solare.

L'era dei quasar

I quasar più lontani sono così distanti da noi che il loro spostamento verso il rosso ha allungato le lunghezze d'onda

della loro luce di un fattore almeno 6.[5] Nessuna delle galassie fotografate dallo Space Telescope è così lontana. Questi quasar ultraremoti si mostrano così luminosi solo a causa della loro intrinseca brillantezza. Quanto tempo fa questa antichissima luce ha iniziato il suo viaggio? Se il nostro universo si fosse espanso a velocità costante – senza accelerazioni né decelerazioni – allora, quando si trovava a un sesto della sua scala attuale (nel senso che le distanze erano tutte rimpicciolite di sei volte) avrebbe dovuto avere un sesto dell'età che ha ora.[6] È però probabile che l'espansione sia andata decelerando, a causa dell'attrazione gravitazionale che ogni oggetto dell'universo esercita su ogni altro oggetto. I primi stadi dell'espansione cosmica sarebbero stati, di conseguenza, relativamente anche più brevi.

Quando osserviamo quasar lontanissimi stiamo dunque guardando un'era in cui l'universo aveva meno di un decimo, invece che circa un sesto, dell'età attuale. Gli astronomi possono quindi sondare l'ultimo novanta per cento della storia cosmica. L'esistenza di questi quasar ci dice che all'epoca in cui l'universo aveva circa un miliardo di anni, alcune galassie, o almeno le loro regioni interne, si erano già formate.

I quasar sono, per così dire, sonde del remoto passato. Si sono rivelati di interesse ancor più fondamentale poiché nei loro nuclei stanno in agguato enormi buchi neri – regioni in cui lo spazio stesso è stato "forato" da collassamenti colossali, e il cui interno potrebbe racchiudere i segreti di come è cominciato il nostro universo, e perfino dei suoi legami con altri universi.

Ma che dire di epoche ancora più remote, prima che le galassie si formassero? Per esempio, come sono emerse dagli amorfi inizi primordiali le strutture che attualmente dominano il nostro universo, le galassie e gli ammassi? È proprio vero che ogni cosa è emersa da un "inizio" densissimo, dieci o venti miliardi di anni fa?

Georges Lemaître, un prete belga che divenne presidente della Pontificia Accademia delle Scienze, si interrogava su questi problemi negli anni immediatamente successivi alla

scoperta dell'espansione dell'universo. Presentava lo scenario dell'"atomo primevo" con queste pittoresche parole:

> L'evoluzione dell'universo può essere paragonata a uno spettacolo di fuochi d'artificio appena terminato. Qualche scoppiettio ancora, ceneri, nuvole di fumo. Seduti su ceneri ormai fredde, osserviamo i soli che si spengono e cerchiamo di richiamare lo svanito splendore dell'origine dei mondi.

Ma tracce di quello svanito splendore dovevano venire scoperte nel 1965.

NOTE

1. La fede di Einstein in un universo statico lo portò a introdurre nelle sue equazioni un elemento extra, cioè una forza di "repulsione cosmica" che potesse controbilanciare la gravità su scala cosmologica. Questo concetto è stato fatto recentemente risuscitare; ne parleremo nel capitolo 8.

2. La regione effettivamente studiata da Hubble è abbastanza piccola da poter essere descritta in modo del tutto adeguato dalla teoria newtoniana; di fatto, l'errore che così si introduce è solo di un centomillesimo. La popolazione delle galassie si estende [*stretches*] fino a distanze assai più grandi: possiamo immaginarci una serie di gusci sferici tutt'intorno a noi, i più grandi dei quali hanno una maggiore velocità di recessione. Velocità che per i gusci più grandi può avvicinarsi a quella della luce, e in questo caso un calcolo newtoniano non è più adeguato. Il lavoro di Fridman teneva conto di questi effetti; esso offre una descrizione adeguata a patto che l'universo sia sufficientemente uniforme in quanto a densità e velocità di espansione. Le regioni locali possono ancora essere validamente concepite in termini newtoniani: una sfera "scavata via" dall'universo di Fridman come una pallina di gelato dal suo contenitore obbedisce esattamente alle leggi di Newton. Quasi tutti i calcoli su come si formano le galassie e su come esse si muovono negli ammassi e nei superammassi utilizzano solo la comune legge dell'inverso del quadrato, cioè la legge newtoniana della gravità. Vedi il capitolo 7.

3. All'interno delle singole galassie non c'è espansione e nemmeno all'interno degli ammassi di galassie. La semplice "legge di Hubble" si applica solo su scale abbastanza grandi perché l'universo possa essere considerato uniforme. In pratica, ciò significa che ci sono significative deviazioni da questa legge su tutte le scale fino a quella dei superammassi.

4. Quando i quasar vennero scoperti nel corso degli anni Sessanta, ci fu un rinnovato e vivace dibattito se gli spostamenti verso il rosso di tali inu-

suali oggetti non potessero avere per caso un'origine speciale. Ci volle qualche anno prima che le evidenze osservative convincessero la maggior parte degli astronomi del fatto che gli spostamenti verso il rosso dei quasar obbediscono anche loro alla legge di Hubble.

5. La luce che ci arriva dai quasar, in effetti, è stata emessa a lunghezze d'onda ben al di là dell'estremità blu dell'arcobaleno. Tale radiazione non può essere percepita dall'occhio umano, e non potrebbe nemmeno penetrare nell'atmosfera terrestre. Ma la radiazione ultravioletta di questi remotissimi oggetti, quando ci raggiunge, è stata "spostata" fino a essere luce rossa. L'antichissima luce ordinaria da loro emessa, e compresa fra il rosso e il blu, ci arriverebbe, per lo stesso motivo, sotto forma di radiazione.

6. Questo tipo di asserzione, a prima vista, può lasciare perplessi, dato che la velocità della luce rappresenta un "limite ultimo" di velocità. I quasar non dovrebbero forse allontanarsi a cinque volte la velocità della luce? Infatti, dell'età attuale dell'universo, la loro luce ne ha impiegato i $^5/_6$ per tornare fino a noi. Ora, la teoria della relatività ristretta di Einstein ci dice che nessun moto può avere una velocità maggiore di quella della luce. Come si spiega il paradosso? Il fatto è che per la relatività la velocità della luce costituisce una velocità limite solo quando il tempo sia misurato da un orologio che *non condivida* tale moto. Inoltre, la stessa teoria ci dice anche che un orologio che si muova velocemente rallenta il suo battito. (Fatto questo che è alla base del paradosso dei gemelli, descritto nel capitolo 13.) Un orologio che si muove velocemente può in effetti viaggiare per cinque ore luce per ogni ora che segna sul suo quadrante: occorrerebbe che viaggiasse a circa il 98 per cento della velocità della luce.

3

STORIA PREGALATTICA: LA PROVA DECISIVA

Questo è il *nostro* universo, è il nostro museo della bellezza, la nostra *wunderkammer*, la nostra cattedrale.

JOHN ARCHIBALD WHEELER

L'ultimo bagliore della Palla di Fuoco

In un manuale d'annata (1970) del cosmologo canadese James Peebles, un capitolo è intitolato "Momenti d'oro della cosmologia". Di simili momenti ne vengono però menzionati solo due. Il primo è la scoperta di Hubble che il nostro universo è in espansione (ne abbiamo parlato nel capitolo precedente). L'altro è la scoperta di Arno Penzias e Robert Wilson dell'"ultimo bagliore della creazione" – più prosaicamente noto come radiazione cosmica di fondo. Si trattò di una scoperta accidentale, fatta presso i Bell Telephone Laboratories nel 1964-65, grazie a un'antenna molto sensibile che era stata progettata per essere usata con i satelliti Echo per le comunicazioni. Anzi, Penzias e Wilson non si resero subito conto di ciò che avevano trovato. Avevano scoperto che lo spazio intergalattico non era completamente freddo. La loro antenna captava microonde – radiazioni dello stesso tipo di quelle usate nei forni a microonde, per l'appunto, ma molto meno intense – che sembravano provenire con uguale intensità da tutte le direzioni e non avevano nessuna sorgente chiaramente identificabile: non l'atmosfera, non tipi noti di radiosorgenti

di origine cosmica. Questo calore era un residuo di quello "svanito splendore" di cui parlava Lemaître; un residuo della "Palla di Fuoco" in cui ogni cosa era stata compressa fino a diventare più calda e densa del centro delle stelle.

L'articolo di Penzias e Wilson che annunciava "un eccesso di temperatura di antenna a 4080 Mc/s" apparve nel numero del 1965 dell'*Astrophysical Journal*. L'eccesso equivaleva a circa tre gradi sopra lo zero assoluto. Nonostante si tratti ovviamente di un freddo cane (–270 gradi Celsius), in un senso ben definito si può dire che lo spazio intergalattico contiene moltissimo "calore". Ogni metro cubo contiene circa 400 milioni di quanti di radiazione, o fotoni; al confronto, la densità media degli *atomi* nell'universo è solo di 0,1 atomo per metro cubo. Quest'ultima cifra non è nota con altrettanta precisione della prima, perché la maggior parte degli atomi potrebbe trovarsi in gas diffusi o nella cosiddetta materia oscura; ma sembra che ci sia almeno un miliardo di fotoni per ogni atomo dell'universo.

La sola spiegazione plausibile per la radiazione di fondo a microonde è che essa sia una sopravvissuta, una reliquia dell'epoca in cui il nostro intero universo era caldo, denso e opaco. Fu proprio la sua scoperta che portò rapidamente all'accettazione generale di questa concezione così radicale.

(Questo riorientamento dell'atteggiamento dei cosmologi assomiglia un po' all'improvviso e drastico cambiamento d'opinione dei geofisici avvenuto più o meno alla stessa epoca. La deriva dei continenti era stata sostenuta già molto tempo prima da Alfred Wegener, che originariamente era stato – come il pioniere della cosmologia Aleksandr Fridman – un meteorologo. Ma le prove disponibili prima del 1965 erano solo suggestivi indizi; i geofisici trovavano implausibile l'idea, e per lo più tendevano a scartarla. Ma dopo che Drummond Matthews e Frederick Vine, geofisici di Cambridge, mostrarono in modo convincente che il fondale marino si andava espandendo a partire dalle dorsali medio-oceaniche, scoppiò un improvviso consenso. L'Europa e l'America si stanno

muovendo in direzioni opposte con la stessa velocità con cui crescono le vostre unghie.)

La scoperta di Penzias e Wilson era stata preceduta da tutta una serie di casi fortuiti, equivoci e mancate comunicazioni. George Gamow, un emigrato russo negli Stati Uniti, fu, insieme con Georges Lemaître, uno dei primi sostenitori di ciò che oggi chiamiamo Big Bang. Negli anni Quaranta Gamow, insieme con i suoi studenti Ralph Alpher e Robert Hermann, aveva proposto che l'universo avesse cominciato la sua esistenza in uno stato molto caldo. I tre calcolarono perfino che l'attuale temperatura dell'universo avrebbe dovuto essere circa cinque gradi sopra lo zero assoluto, ma non iniziarono nessuna ricerca sperimentale della radiazione-relitto, anche se, persino in quell'epoca, sarebbe stata fattibile.[1]

Negli anni Cinquanta alcuni radioastronomi in Francia e in Russia avevano notato un rumore di fondo che non poteva essere attribuito a effetti strumentali o a sorgenti note. Nel 1961 ci fu un altro esperimento, effettuato da Edward Ohm in America. Yakov Zel'dovič e altri cosmologi russi ne avevano sentito parlare, ma equivocarono su cosa intendesse Ohm, un radiotecnico, per *sky background*, e ne dedussero erroneamente che volesse *escludere* la possibilità di una temperatura di fondo (*background*) superiore a un grado. Igor Novikov e Andrej Dorovškevič di Mosca si resero conto nel 1962 che la radiazione-relitto del Big Bang avrebbe dovuto essere rilevabile: notarono persino che l'antenna di Holmdel nel New Jersey – quella usata da Penzias e Wilson – sarebbe stata adattissima per l'esperimento. Novikov dirige ora un suo istituto a Copenhagen e continua a essere uno dei leader della ricerca cosmologica. Egli ritiene che i primi teorici siano stati indebitamente pessimisti sulle possibilità di rilevare la radiazione di fondo, perché si rendevano conto, e a ragione, che l'energia di questa non sarebbe stata maggiore di quella trasportata dalla luce delle stelle o dai raggi cosmici (particelle in rapido movimento, prodotte principalmente dalle esplosioni delle supernove che pervadono tutta la Galassia). Poiché queste energie erano a loro volta piuttosto incerte, non sembrava fattibile, a

un primo esame, isolare una radiazione di fondo "cosmologica". Ma questo ragionamento non teneva conto del fatto che la radiazione primordiale, diversamente dalle altre radiazioni di fondo, si sarebbe trovata concentrata nella banda delle microonde (lunghezze d'onda dell'ordine di centimetri o millimetri) e avrebbe avuto un suo spettro caratteristico.

I primi che si misero a cercare sistematicamente una radiazione cosmica di fondo furono Robert Dicke e i suoi colleghi di Princeton. L'idea di un universo *oscillante* piaceva molto a Dicke. Lo preoccupava però l'accumularsi di "spazzatura nucleare" su scala cosmica. Le stelle derivano la loro energia convertendo l'idrogeno in elio, e poi trasformando l'elio in altri elementi della tavola periodica. Se ci fossero già stati molti cicli, perché mai non era stato trasmutato tutto in ferro? Dicke cercava di sfuggire a questa obiezione sostenendo che, nel rimbalzo, ogni cosa diventava così calda e le collisioni tra le particelle così violente che i nuclei di ferro (fatti da 26 protoni e 30 neutroni) sarebbero stati scissi; a ogni ciclo sarebbe stata distribuita una nuova "smazzata" di idrogeno e di elio.

Le teorie di Dicke sono ormai sorpassate: se un nuovo universo emerge veramente come la Fenice dal collasso del vecchio, la fisica di questo "rimbalzo" è così esotica che nessuna singola particella (e forse nemmeno la "memoria") del ciclo precedente sopravviverebbe. Ma queste idee motivarono Robert a cercare i relitti della "Palla di Fuoco primordiale". Dicke, per quanto si interessasse profondamente di cosmologia e di gravitazione, era soprattutto un fisico sperimentale, e aveva proprio quell'esperienza tecnica che serviva per costruire il "radiometro" necessario.

Penzias e Wilson non si erano interessati molto di cosmologia, e non c'era quindi ragione che conoscessero le ricerche di Alpher, Hermann e Gamow. Ma nel caso di Dicke la cosa è molto più sorprendente. Il lavoro di Novikov, pubblicato su riviste sovietiche, poteva comprensibilmente essergli sfuggito, ma sembrano esserci meno scuse per articoli pubblicati in riviste specializzate americane di prima importanza, come nel caso del gruppo di Gamow.

Se non fosse stato per Dicke, Penzias e Wilson avrebbero anche potuto non accorgersi di ciò che avevano scoperto. Quando Dicke seppe dei risultati ottenuti ai Bell Laboratories, la sua reazione fu: "Ce l'hanno fatta sotto il naso!". E poco dopo il gruppo di Princeton eseguì delle misurazioni per conto proprio, che corroboravano la scoperta. Tutto questo episodio mostra quanto casuale e imprevedibile possa essere una grande scoperta. Lemaître, che ne venne a conoscenza poche settimane prima di morire, ne fu deliziato. C'è un solo motivo di rimpianto: Dicke, un'intelligenza notevolissima, con capacità uniche di combinare l'inquadramento teorico con le conoscenze e l'esperienza sperimentale che occorrevano, vi giocò un ruolo da comprimario, invece di essere (come sarebbe stato giusto) il primo e principale scopritore della radiazione di fondo.

Dicke e i suoi colleghi di Princeton esplicitarono che cosa significasse questa radiazione nello stesso numero dell'*Astrophysical Journal* in cui Penzias e Wilson annunciavano la loro scoperta. Secondo la versione ormai standard, ogni cosa nel nostro universo – tutta la materia di cui è fatta ogni galassia – si era trovata compressa in modo inimmaginabile sotto forma di gas caldissimo, più caldo del nucleo del Sole. L'intensa radiazione di questa Palla di Fuoco sarebbe ancora in circolazione, anche se raffreddata e diluita dall'espansione, e pervaderebbe l'universo intero: le microonde sarebbero un'eco dell'esplosione che diede inizio all'espansione universale.

Robert Wilson notò, in seguito, che lui stesso si era reso pienamente conto dell'importanza di ciò che aveva scoperto solo leggendo una versione divulgativa dei propri risultati nel *New York Times*. Questa reazione illustra un rischio che corrono tutti gli scienziati. In generale, i ricercatori non puntano direttamente a un grande obiettivo. A meno che non siano dei geni (o degli eccentrici), si concentrano su problemi a portata di mano che sembrano opportuni o trattabili. È questa la metodologia che paga, per la maggior parte di noi. Ma così possiamo dimenticare che ci stiamo infilando dei paraocchi e che le nostre parcellizzate fatiche hanno un valore solo se rappre-

sentano invece delle tappe verso la soluzione di un qualche problema fondamentale. La risposta dei non addetti ai lavori spesso ci aiuta a collocare il nostro contributo nella giusta prospettiva.

Verso COBE

Nel suo stato primordiale di "Palla di Fuoco", il nostro universo sarebbe stato un gas quasi amorfo, fatto di atomi mescolati a quanti di radiazione (fotoni). A quelle altissime temperature gli atomi sarebbero stati frantumati nelle loro parti costitutive, elettroni e nuclei. I fotoni, ripetutamente assorbiti e diffusi, avrebbero raggiunto l'equilibrio con l'ambiente circostante: si sarebbero trasformati in ciò che i fisici chiamano "radiazione di corpo nero", o "termica". Una volta che la radiazione sia stata misurata su una qualche lunghezza d'onda, una semplice formula ci dice quale intensità tale radiazione dovrebbe avere su tutte le altre lunghezze d'onda. Negli anni successivi alla scoperta di Penzias e Wilson, vennero compiute almeno 30 misure diverse su lunghezze d'onda differenti. Sembrava che fossero tutte compatibili con una radiazione termica. Per la maggior parte le misure erano state effettuate al suolo su lunghezze d'onda dell'ordine del centimetro. Ma se la radiazione fosse stata veramente termica, la sua energia si sarebbe concentrata su lunghezze d'onda intorno ai due millimetri. Le misurazioni più cruciali erano, dunque, quelle della banda dei millimetri, piuttosto che dei centimetri. Disgraziatamente, l'atmosfera della Terra è opaca a queste lunghezze d'onda più corte e fino al 1990 le misurazioni dirette, effettuate utilizzando palloni sonda e missili, rimasero ambigue e incerte.

Fu il Cosmic Microwave Background Explorer (COBE), un satellite specificamente progettato per compiere misure precise della radiazione di fondo a microonde nella banda dei millimetri, a mettere fine a queste incertezze. John Mather e i suoi colleghi scoprirono che lo spettro segue quello di corpo nero con un'approssimazione superiore a un decimillesimo.

La temperatura è di 2,728 gradi Kelvin. Quando i primi risultati di COBE furono presentati alla American Astronomical Society, una platea di 1500 presenti accolse questo magnifico risultato con un prolungato applauso. Dopo una conferma del genere, non ci poteva più essere alcun ragionevole dubbio che questa radiazione fosse in effetti un relitto di quella densa Palla di Fuoco da cui doveva essere scaturito il nostro universo.

Immaginate una scatola i cui lati, di lunghezza R, si espandano insieme all'universo. Assumendo che l'universo sia omogeneo, il contenuto della scatola – materia (elettroni e nuclei) e radiazione (fotoni) – ne rappresenterà un campione significativo. Se le lunghezze d'onda di tutte le radiazioni contenute nella scatola si allungano proporzionalmente a R, la temperatura diminuisce con $1/R$. Occorrerebbe circa mezzo milione di anni perché l'espansione raffreddi la mistura primordiale fino a tremila gradi, una temperatura un po' più bassa di quella della superficie del Sole. Gli elettroni, allora, rallenterebbero abbastanza da attaccarsi ai nuclei, formando atomi elettricamente neutri, che non potrebbero disperdere la radiazione con altrettanta efficacia degli elettroni liberi dei più caldi stati precedenti. Da quel momento in poi il materiale primordiale diventerebbe trasparente. I fotoni delle microonde rilevati da COBE e da altri strumenti sono messaggeri che provengono direttamente dall'epoca in cui il nostro universo era migliaia di volte più compresso – quando si trovava a 3000 gradi invece che a 2,7, e molto prima di quando si formò la prima galassia. Ma quei fotoni, ormai diluiti nello spazio e spostati verso la banda a microonde dello spettro, sono ancora in circolazione. Riempiono il nostro universo e non hanno nessun altro posto in cui andare.

Il problema dell'elio: altre prove di un Big Bang "caldo"

La radiazione di fondo a microonde è una specie di fossile di stadi antichissimi dell'espansione. Sembra però che nel no-

stro universo ci sia un'altra importante reliquia della Palla di Fuoco primordiale: l'elio, che forma circa un quarto della massa della maggior parte delle stelle, Sole compreso.

Fino a quando i quattro autori noti come B^2FH (vedi capitolo 1) non proposero una teoria di come gli atomi venissero trasmutati nelle stelle, non esisteva spiegazione seria dei rapporti regolari che si riscontrano tra i vari elementi chimici del nostro sistema solare e delle altre stelle. Lemaître e Gamow avevano congetturato che l'intera mistura fosse stata cucinata negli istanti iniziali dell'espansione cosmica. All'epoca non si conosceva abbastanza della fisica nucleare per riuscire a quantificare quest'idea. Si è poi scoperto che non funziona: l'espansione è stata troppo veloce per dare alla serie di reazioni nucleari il tempo necessario a effettuarsi. Per di più, se gli elementi chimici fossero tutti di origine primordiale (nel senso che la loro esistenza avrebbe preceduto quella delle stelle e delle galassie), i loro rapporti avrebbero dovuto essere gli stessi dappertutto: che le stelle più vecchie contengano una quantità proporzionalmente minore di elementi pesanti rispetto all'idrogeno risulterebbe un fatto del tutto misterioso. Mentre sarebbe una cosa del tutto naturale se gli elementi si fossero andati gradualmente accumulando nel corso della storia galattica.

Fred Hoyle (la H di B^2FH) preferiva in effetti un universo in stato stazionario. Ma fu Hoyle che, in una famosa serie di trasmissioni radiofoniche, rese popolare il nome "Big Bang" per la teoria che osteggiava. Questo termine derisorio esprimeva tutta la sua ripugnanza per le idee di Lemaître e Gamow.[2] Non si trattò di un fatto accidentale che l'idea chiave che gli atomi della tavola periodica risultassero dalle trasmutazioni delle stelle provenisse da un "uomo di stato-stazionario": il dogma centrale della teoria dello stato stazionario era che ogni singolo filo dell'evoluzione cosmica deve essere in corso anche ora, da qualche parte nell'universo. I luoghi dove si formano gli elementi bisognava, dunque, andarli a cercare nell'universo attuale: non potevano venir relegati in un'era inosservabile (quella del Big Bang). La teoria dello stato stazionario fu generalmente abbandonata verso la fine degli anni Sessanta, per i motivi che abbiamo descritto nel capitolo 2. Ma aveva lasciato un'eredità duratura, dato che aveva stimolato la concezione, questa sì coronata da successo, della nucleosintesi nelle stelle.

Da un certo punto di vista, però, anche Lemaître e Gamow sono stati riscattati. I processi stellari non possono dar conto di *tutti* gli elementi. L'elio, in particolare, costituisce un problema. Ci si aspetterebbe, a prima vista, che l'elio sia l'elemento più facile da spiegare, dato che le stelle passano la maggior parte della loro vita a fabbricarlo, fondendo l'idrogeno. Tuttavia, la maggior parte dell'elio prodotto nelle stelle viene poi lavorato per ottenere altri elementi della tavola periodica prima di essere riciclato nello spazio interstellare (e poi, di nuovo, nelle stelle). Le stelle, di conseguenza, nel corso del loro intero ciclo vitale, dovrebbero convertire in elementi pesanti una quantità d'idrogeno pari a quella che convertono in elio. Ma gli elementi "pesanti", tutti insieme, ammontano solo all'uno o al due per cento della materia presente nel sistema solare e in stelle simili al Sole.[3] Se la nostra Galassia avesse iniziato la sua vita costituita solo da idrogeno puro, solo una piccola percentuale di questo idrogeno avrebbe potuto essere processato dalle reazioni nucleari delle stelle prima che nascesse il sistema solare; di conseguenza è piuttosto problematico che persino gli oggetti più antichi (in cui gli elementi pesanti costituiscono assai meno dell'uno per cento della massa totale) risultino costituiti da un 23-24 per cento di elio. Non è mai stata trovata nessuna stella, nessuna galassia, nessuna nebulosa che ne contenga una percentuale minore. Sembrerebbe proprio che la Galassia non sia stata all'inizio costituita solo da puro idrogeno, ma da un miscuglio di idrogeno e di elio. (Lo strato superficiale del Sole è costituito per il 27 per cento di elio, e il 3-4 per cento in più è proprio quello che sarebbe stato fabbricato insieme al carbonio, all'ossigeno e al ferro.)

Hoyle e il suo più giovane collega Roger Tayler furono i primi a rendersi conto di cosa potessero significare queste alte percentuali di elio riscontrabili un po' ovunque. Suggerirono

un'origine diversa: un'esplosione assai più grande di quella di una supernova. Hoyle aveva passato gran parte del 1963 a meditare su questi fenomeni. La scoperta dei quasar, avvenuta all'inizio di quell'anno (vedi capitolo 2), aveva destato il suo interesse e lo portò a chiedersi se non potessero esistere delle superstelle, di massa pari a milioni di volte quella del Sole, e a calcolare quanta energia potessero generare.

Nei mesi in cui questi pensieri erano in gestazione Hoyle era stato incaricato di tenere a Cambridge un corso avanzato, rivolto a neolaureati. Le lezioni non avevano un programma predeterminato e quelli che le frequentarono nel 1964 ebbero il privilegio di seguire, settimana dopo settimana, l'emergere di idee che sarebbero poi divenute canoniche nel campo.

Hoyle e Tayler calcolarono che cosa sarebbe successo all'interno di una superstella pesante milioni di volte di più di una stella ordinaria durante la sua *esplosione*. Se questa fosse iniziata a una temperatura superiore ai dieci miliardi di gradi, scoprirono che all'incirca il 25 per cento del suo materiale sarebbe stato trasformato in elio nel corso dei primi cento secondi; il materiale in esplosione sarebbe poi diventato troppo freddo e diluito per trasmutare l'elio in ulteriori elementi della tavola periodica. Così, se tutto fosse stato "lavorato" all'interno di una superstella, il mistero dell'elio sarebbe stato risolto.

Si crede oggi che i quasar abbiano enormi buchi neri nei loro centri (vedi capitolo 5). Ma fino agli anni Settanta non c'era un consenso generale su questo punto. Quando i quasar erano stati appena scoperti, Hoyle e altri teorici si sentivano autorizzati a credere che superstelle potessero esistere veramente. Ma era plausibile che ci fossero state così tante superstelle che tutta la materia dell'universo fosse stata fabbricata da loro? Se sono instabili, se esplodono così rapidamente, come si sarebbero potute formare?

Queste preoccupazioni suggerivano un'immagine più radicale. Forse l'elio era stato prodotto in un qualcosa persino più grande di una superstella: un Big Bang cosmico, da cui tutte le cose sarebbero venute fuori. Un anno dopo Penzias e Wilson scoprirono la radiazione di fondo a microonde, che sembrava

effettivamente essere l'ultimo bagliore di un "inizio" molto caldo. Hoyle, allora, congiunse le sue forze con quelle di Fowler, il suo vecchio compagno nelle ricerche sulla nucleosintesi stellare. Arruolarono un collaboratore più giovane, Robert Wagoner, che li aiutasse a calcolare tutta la rete di reazioni nucleari che potevano essersi verificate nelle prime fasi caldissime. Era una caratteristica del suo stile versatile e "cattolico". Hoyle, difensore duro, e a oltranza, della teoria dello stato stazionario, gettò le fondamenta di uno dei "pilastri" di quella teoria del Big Bang che derideva.

Ma possiamo seriamente pensare di estrapolare a ritroso nel tempo, fino all'epoca in cui l'universo era miliardi di volte più caldo di ora? Gli atomi (o i loro nuclei) sarebbero stati 10^{27} volte più densamente impacchettati di quanto sono oggi. Il nostro universo attuale è così diluito – circa 0,1 atomi per metro cubo – che persino moltiplicando per 10 la densità attuale ventisette volte di seguito, quella che si ottiene è una densità minore di quella dell'aria! Solo se estrapoliamo ancora più indietro, fino al primo *milli*secondo, dobbiamo cominciare a preoccuparci delle indeterminazioni della fisica delle ultradensità. E le reazioni nucleari che entrano in gioco nella formazione dell'elio possono essere misurate direttamente in laboratorio e non comportano nessuna estrapolazione largamente indeterminata delle conoscenze acquisite nel dominio sperimentale.

L'elio è il solo elemento che avrebbe potuto venir creato in abbondanza nel corso di un Big Bang. Fatto confortante, perché la teoria della sintesi degli elementi nelle stelle e nelle supernove non poteva spiegare perché ci sia tanto elio e perché l'elio sia così uniforme nelle sue percentuali relative, anche se dava conto assai bene di quelle del carbonio, del ferro, e via dicendo. L'attribuzione della creazione dell'elio al Big Bang risolveva così un annoso problema e incorraggiava i cosmologi a prendere sul serio i primi secondi della storia cosmica.

La teoria faceva una predizione ben definita: niente avrebbe potuto avere meno del 23 per cento di elio. Da allora gli astronomi hanno fatto grandi progressi nel misurare le per-

centuali degli elementi nelle stelle e nelle nebulose. La percentuale di elio presente negli oggetti più antichi è oggi saldamente fissata fra il 23 e il 24 per cento. Un altro prodotto del Big Bang doveva esser stato il *deuterio* (o idrogeno pesante). Un atomo di deuterio non contiene solo un protone, ma anche un neutrone, il che aggiunge massa all'atomo, ma non carica elettrica. La quantità di deuterio è solo qualche centomillesimo di quella dell'idrogeno. Ma la sua origine pone un problema perché esso viene distrutto, e non creato, nelle stelle: è infatti un combustibile nucleare più facile ad accendersi dell'idrogeno ordinario e le stelle appena formate distruggono rapidamente tutto il loro deuterio prima di assestarsi nella fase in cui bruciano idrogeno.

È notevolissimo che le percentuali osservate dell'elio e del deuterio (e anche del litio) concordino tutte con le predizioni della teoria della nucleosintesi nel Big Bang. Questi elementi furono prodotti nei primissimi minuti, quando l'universo era ancora a una temperatura di miliardi di gradi; il risultato (e in particolare la quantità di deuterio) dipende da quanto fosse denso esattamente l'universo in quel breve periodo, dato questo che è direttamente correlato a quanto sia denso ora. Le percentuali osservate avrebbero potuto essere completamente sballate rispetto alle previsioni teoriche; o avrebbero potuto anche concordare, ma solo al patto che la densità fosse molto più bassa (per esempio) di quanto non sia quella reale dell'universo. Risulta, invece, che le percentuali osservate concordano tutte con quelle previste, purché ci siano, in media, da 0,1 a 0,3 atomi per metro cubo nell'universo attuale. È molto soddisfacente il fatto che questa sia proprio la densità che avrebbe l'universo se la materia di tutte le galassie venisse distribuita uniformemente in tutto lo spazio.[4]

Ma dovremmo credere a un Big Bang "caldo"?

Non è solo la moda che raccomanda l'idea di un Big Bang caldo. C'è un sostegno empirico reale: questa concezione ci

offre un racconto coerente della storia della materia e della radiazione.

Le basi per estrapolare dal presente al passato, fino allo stadio in cui il nostro universo si stava espandendo da un secondo (quando cioè cominciò a formarsi l'elio), meritano di essere prese sul serio, almeno quanto le inferenze che si fanno sulla storia primordiale della Terra partendo dallo studio di rocce e fossili. Queste inferenze sono altrettanto indirette, ma anche meno quantitative. Scommetterei dieci contro uno che la concezione del Big Bang caldo descrive il modo con cui si è evoluto l'universo da quando aveva circa un secondo di vita. C'è anche chi è persino più fiducioso. All'assemblea generale della International Astronomical Union che si tenne in Grecia nel 1982, il cosmologo sovietico Yakov Zel'dovič (che fin dagli anni Sessanta aveva contribuito con più idee di chiunque altro a questo campo) tenne un'esuberante conferenza in un teatro all'aperto in cui affermò che il Big Bang era un fatto, certo come "è certo che la Terra giri intorno al Sole". Si doveva essere dimenticato di quello che diceva il suo compatriota Lev Landau: "I cosmologi sono spesso in errore, mai nel dubbio"!

Zel'dovič morì nel 1987, solo pochi mesi dopo che gli era stato permesso di fare un viaggio negli Stati Uniti. (Era stato, insieme a Sacharov e a Kurčatov, uno dei promotori del progetto sovietico per la costruzione della bomba all'idrogeno. Il che – anche se gli era valso di essere premiato tre volte come "Eroe dell'Unione Sovietica" e di essere decorato con non meno di otto Ordini di Lenin – fece sì che il suo viaggio fosse ancor più strettamente controllato di quello di altri suoi colleghi.)

La prova che Zel'dovič trovava così cogente è oggi ancora più forte. I supposti relitti del Big Bang (la radiazione cosmica di fondo e i cosiddetti "elementi leggeri", elio, deuterio e litio) sono stati osservati con molta maggiore accuratezza. Inoltre, si possono immaginare varie scoperte che, se effettuate, *avrebbero potuto* confutare il modello. Invece, *non sono state fatte*. Per esempio:

– Gli astronomi avrebbero potuto scoprire un oggetto la cui percentuale di elio fosse nulla, o, in ogni caso, ben inferiore al 23 per cento, il minimo assoluto che sarebbe venuto fuori dalla Palla di Fuoco (l'elio in più che viene fabbricato nelle stelle può ben far salire l'elio *al di sopra* della percentuale pregalattica, ma non c'è modo di riconvertire tutto l'elio in idrogeno).

– La radiazione di fondo potrebbe essersi rivelata imbarazzantemente diversa dalla forma di radiazione di corpo nero che ci si aspettava. In particolare, l'intensità misurata dal COBE a livello delle lunghezze d'onde più corte (millimetriche) avrebbe potuto essere *più debole* di quanto predicessero le estrapolazioni effettuate a partire dalle misurazioni fatte sulla banda dei centimetri. Molti processi potrebbero aver *aggiunto* altra radiazione a livello della banda dei millimetri – per esempio, emissioni provenienti dalla polvere o da stelle con spostamenti verso il rosso molto elevati. Ma sarebbe difficile interpretare una temperatura sulla lunghezza d'onda dei millimetri che fosse *più bassa* di quella della banda dei centimetri.

– La Palla di Fuoco conteneva *neutrini* oltre che fotoni. Queste particelle interagiscono molto debolmente con qualsiasi altra cosa e quei neutrini, di conseguenza, sarebbero sopravvissuti fino al giorno d'oggi. Ci dovrebbero essere quasi altrettanti neutrini che fotoni – i rispettivi numeri sono piuttosto facili da calcolare e lo si può fare senza ambiguità. Ci sono oggi circa 400 milioni di fotoni per metro cubo; e dovrebbero esistere tre tipi di neutrini, ciascuno con una densità di 110 milioni per metro cubo. I neutrini, dunque, superano gli atomi per un fattore enorme – circa un miliardo – esattamente come i fotoni. Se ciascun neutrino pesasse anche solo la milionesima parte di un atomo, essi, presi globalmente, contribuirebbero troppo alla massa dell'universo attuale – ci sarebbe troppa massa, persino di più di quanta ne potrebbe esistere nascosta nella materia oscura (vedi capitolo 6). I fisici sperimentali si sono impegnati moltissimo a misurare la massa del neutrino, che, quasi certamente, è molto piccola. Se avessero

ottenuto una risposta positiva troppo alta, avremmo dovuto abbandonare l'idea del Big Bang, ma una tale risposta non è stata trovata.

Il concetto di Big Bang ha vissuto una vita spericolata per più di 25 anni. Se i vari esperimenti e osservazioni fossero andati in modo diverso, ne sarebbe uscito morto. La sopravvivenza della teoria ci permette di estrapolare fiduciosamente fino ai primi secondi della storia cosmica e di assumere che già allora le leggi della microfisica erano le stesse di adesso. Ma dobbiamo rimanere in allerta, le contraddizioni sono sempre possibili: la nostra attuale soddisfazione potrebbe riflettere la pochezza dei dati più che l'eccellenza della teoria. È concepibile che la nostra fiducia sia mal riposta, e che la nostra soddisfazione si dimostri transitoria come quella dell'astronomo di fede tolemaica, tutto felice quando gli riusciva di sistemare un epiciclo.

Quando la teoria dello stato stazionario era un concorrente serio, molti cosmologi (e non solo i suoi inventori) *speravano* che le osservazioni l'avrebbero giustificata. Era un'idea allettante, perché, se fosse stata corretta, ogni cosa accaduta – l'origine delle galassie di tutti i tipi, l'origine di tutti gli elementi chimici, e così via – starebbe accadendo ancora adesso, da qualche parte. In un universo generato da un Big Bang, invece, le caratteristiche chiave potrebbero essere eredità di un'epoca remota, nascosta nel sudario dei tempi, inaccessibile, frustrante ogni tentativo di osservazione. O almeno così sembrava allora, quando i telescopi erano riusciti a penetrare solo fino a spostamenti verso il rosso piuttosto modesti.

Ma gli "uomini di stato-stazionario" non si sarebbero mai aspettati che riuscissimo a "osservare" epoche molto primordiali, ed erano troppo pessimisti sulle prospettive di riuscire a comprendere veramente un universo in evoluzione. La radiazione cosmica di fondo e gli elementi come l'elio ci forniscono una vera e propria informazione quantitativa su quelle prime fasi dell'inizio. I processi cosmogonici cruciali si sono dimostrati tanto accessibili all'osservazione e trattabili con calcoli

ed esperimenti, quanto avrebbero potuto esserlo in un universo stazionario.

La radiazione di fondo a microonde è probabilmente la più notevole scoperta cosmologica degli ultimi cinquanta anni. (La sola scoperta che potrebbe rivaleggiare con lei per il primo posto è stato lo studio teorico delle straordinarie proprietà dei buchi neri e l'osservazione pratica che tali entità esistono per davvero. Ne parleremo nel prossimo capitolo.) Dagli anni Sessanta in poi quasi tutti i cosmologi sono convinti che un Big Bang sia effettivamente avvenuto.

Questo saldo sostegno empirico (e un saldo legame con la fisica "conosciuta") permette di ragionare su cosa sia sucesso quando il nostro universo aveva appena pochi secondi: abbiamo parlato in questo capitolo delle implicazioni della radiazione di fondo e dell'esistenza dell'elio cosmico. Quando, nei capitoli successivi, ci avventureremo fino al primo millisecondo, ci troveremo su un terreno assai più infido, ed è bene non nascondercelo. I cosmologi non dovrebbero mescolare cose ormai piuttosto ben stabilite con teorie che non hanno ancora raggiunto questo stato. Confondendo questa distinzione c'è il rischio che i lettori o accettino con eccessiva credulità arrischiate speculazioni sui primissimi momenti dell'universo, o che i più scettici non riescano a capire che quelle parti della cosmologia che riguardano stadi più tardi sono fondate molto più saldamente sulle osservazioni e sulla fisica che possiamo sperimentare nei nostri laboratori.

Ma alcuni problemi che un tempo appartenevano esclusivamente al dominio della speculazione stanno oggi entrando in quello dell'indagine scientifica seria. Che cos'è che determina la miscela di materia e radiazione nell'universo? Perché ci sono miliardi di fotoni per ogni atomo? E perché il nostro universo ha quell'uniformità globale che permette di trattare di cosmologia, e al tempo stesso permette la formazione di galassie, ammassi e superammassi? E che cos'è che ha dato alle leggi fisiche la loro impronta? Le risposte dipendono sicuramente dalla fisica delle ere ultraprimordiali, là dove i misteri

del cosmo e del micromondo si sovrappongono. Ritornerò su questo nel capitolo 9.

Voi, però, potreste star pensando: non è una pretesa assurdamente presuntuosa pensare di poter *mai* arrivare a sapere checchessia degli inizi del nostro universo? No, non necessariamente. È la complessità, e non le dimensioni in sé e per sé, ciò che rende un sistema difficile da capire. È più facile capire il Sole della Terra: è più caldo e denso, non ci sono minerali o composti chimici che possano sopravvivervi, e ogni cosa viene scissa in atomi separati. Analogamente, nell'ambiente ancora più estremo della Palla di Fuoco primordiale, ogni cosa deve essere stata sicuramente ridotta ai suoi componenti più fondamentali. L'universo primordiale potrebbe essere più facile da comprendere di quanto lo sia il più semplice organismo vivente. È ai biologi e ai darwinisti che è toccata la sfida più dura.

Sostenuto da questi pensieri, mi avventurerò in un territorio assai più speculativo. Ma dovremo prima discutere di stelle di neutroni, in cui la materia viene strizzata fino a una densità simile a quella del primo millisecondo della storia cosmica. E di buchi neri, in cui ci confrontiamo, come nel Big Bang, con condizioni così estreme che trascendono le nostre conoscenze attuali. Questi oggetti, come d'altra parte l'universo stesso, sono dominati dalla forza di gravità. Nel prossimo capitolo riassumeremo ciò che sappiamo su questa forza e i misteri che tuttora ci propone.

NOTE

1. E non si accorsero nemmeno che esisteva già una prova indiretta, che risaliva al 1941. L'astronomo canadese Andrew McKellar, studiando gli spettri delle stelle, trovò che le molecole di cianogeno (un composto chimico costituito da un atomo di carbonio e uno di azoto) di una nube interstellare che si trovava sulla sua linea di vista esibivano caratteristiche molto significative. McKellar si aspettava che le molecole di cianogeno dovessero essere completamente fredde e si dovessero quindi trovare nel loro stato di minima energia (il cosiddetto "stato fondamentale"). E invece no: sembravano, a giudicare dai loro spettri, essere immerse in un bagno di radiazione

che McKellar stimava sui 2,4 gradi Kelvin. Il suo lavoro è citato nel classico trattato di Gerhard Herzberg *Diatomic Molecules*; ma Herzberg aggiungeva che tale temperatura "ha solo un significato molto ristretto"!

2. Lemaître usava il termine "atomo primevo"; Gamow coniò la parola *ylem*.

3. La Terra ha perso la sua parte di idrogeno e di elio; si tratta di sostanze volatili che la gravità del nostro pianeta non può trattenere. Tuttavia, questi elementi sono assolutamente dominanti nel Sole e nei pianeti esterni giganti. Gli altri elementi – carbonio, ossigeno, ferro, e via dicendo – hanno all'incirca gli stessi rapporti sulla Terra, nel Sole e nella maggior parte delle stelle.

4. Questi calcoli vincolano il numero di atomi che possono esistere nell'universo sotto forma di materia "oscura" – cosa alquanto importante, come vedremo nel capitolo 6, per il problema di che cosa tale materia oscura possa essere e se ce ne possa essere abbastanza da porre termine all'espansione del Cosmo.

4

PROFONDITÀ GRAVITAZIONALI

> Newton non fu il primo dell'era della ragione: fu l'ultimo dei maghi, l'ultimo dei babilonesi e dei sumeri, l'ultimo grande spirito che abbia guardato il mondo sensibile e intellettuale con gli stessi occhi di coloro che, poco meno di diecimila anni fa, cominciarono a costruire il nostro patrimonio di idee.
>
> JOHN MAYNARD KEYNES

Da Newton a Einstein

Isaac Newton dedicò anni interi della sua vita all'alchimia e allo studio delle profezie. Anni interi di sforzo intellettuale, forse tanto intenso quanto quello che gli costò la gravità. Perseguiva i suoi esperimenti al Trinity College di Cambridge. A volte erano legati alla fisica, come per esempio il suo famoso esperimento sulla luce col prisma. Ma l'interesse dominante era la chimica: secondo un resoconto del suo tempo, "per sei settimane in primavera e sei settimane in autunno [...] raramente veniva spento il fuoco nel suo laboratorio". Come scrive John Maynard Keynes:

> E *lesse* l'enigma dei cieli. E credette, con le stesse facoltà di intuizione introspettive, di poter leggere l'enigma della Divinità, l'enigma di fatti passati e futuri preordinati per volontà divina, l'enigma degli elementi, e della loro formazione a partire da una materia prima originaria indifferenziata, l'enigma della salvezza e dell'immortalità. Tutto gli si sarebbe svelato se aves-

> se saputo perseverare fino all'ultimo, ininterrottamente, da solo, senza che nessuno varcasse le soglie della sua stanza, leggendo, copiando, sperimentando: chiuso in sé, niente interruzioni per amor di Dio, niente anticipazioni, niente interventi estranei o critiche [...]. Così continuò per quasi cinque lustri [...] in questi studi commisti e fantasiosi, con un piede nel Medioevo e uno che apre la via alla scienza moderna [...].

Il lato "moderno" degli intensi sforzi cerebrali di Newton è rappresentato dalla sua teoria della gravità. La sua ricerca di una concezione matematica unificata dei moti celesti ebbe un successo trionfante, perché le regolarità della Luna, dei pianeti e delle maree erano state registrate da secoli e secoli. Per contro, un approccio altrettanto scientifico alla chimica si sarebbe rivelato prematuro: capire in che modo atomi e molecole soggiacciano al mondo della nostra esperienza quotidiana sarebbe stato un salto troppo grosso per una mente del XVII secolo.

Newton concepì la gravità come una forza che si trasmette istantaneamente fra le stelle e i pianeti. Einstein ci ha però insegnato che nessun segnale e nessuna influenza può viaggiare più velocemente della luce: se, per esempio, il Sole dovesse improvvisamente spegnersi, ci vorrebbero otto minuti (il tempo che la sua luce impiega per arrivare alla Terra) prima che ci accorgessimo che c'è qualcosa che non va. Il che basta, da solo, a farci capire che la teoria di Newton non poteva rappresentare l'ultima parola in materia. Ma i pianeti si muovono svariate migliaia di volte più lentamente della luce, cosicché le leggi di Newton sono pur sempre adeguate per quasi tutte le applicazioni pratiche della gravità sulla Terra. Sono persino abbastanza buone per progettare la rotta di un'astronave fino alla Luna, o fino a Marte, o persino in un *grand tour* che si spinga oltre Giove, attraversando gli stretti passaggi fra gli anelli di Saturno. Le leggi di Newton falliscono seriamente solo quando la gravità è molto più forte che nel sistema solare e induce moti molto più veloci.

La concezione einsteiniana della gravità ha una portata più

vasta. Essa abbraccia situazioni in cui la gravità è molto forte o le velocità sono molto elevate; ci dice come la gravità influenzi la stessa luce; ci permette di descrivere un universo intero. Cosa ancor più importante, essa, più che sostituire, pare confermare le idee di Newton, offrendoci una visione più profonda del *perché* tutti i corpi cadano alla stessa velocità, di qualsiasi sostanza siano fatti e del perché sussista una "legge dell'inverso del quadrato" all'interno del sistema solare. La gravità sembra meno arbitraria e più naturale; inoltre, essa viene collocata in uno schema concettuale che ha implicazioni straordinarie sulla natura dello spazio e del tempo.

La relatività generale di Einstein predice solo esili deviazioni dalla teoria newtoniana all'interno del sistema solare: ciò nonostante queste sue predizioni furono confermate da misurazioni molto accurate. Gli esperimenti sull'incurvarsi dei raggi luminosi a causa della gravità del Sole sono oggi corroborati da controlli che utilizzavano onde radio, ma con una precisione migliaia di volte superiore. Altrettanto accurati sono gli esperimenti sul rimbalzo dei segnali radar o sulla determinazione delle orbite delle sonde spaziali; anche questi hanno corroborato la teoria di Einstein e confutato quelle rivali.

È notevole che la teoria di Einstein non sia stata stimolata dalle osservazioni – essa ha preceduto di almeno cinquanta anni il primo sorgere di quelle scoperte astronomiche che, a partire dagli anni Sessanta, avrebbero rivoluzionato l'astrofisica e la cosmologia. Nelle stelle di neutroni e nei buchi neri, per esempio, la gravità è così forte che le modificazioni relativistiche delle leggi di Newton sono di importanza cruciale, non insignificanti correzioni.

Nel 1905 Einstein, allora ventiseienne, mostrò che se si abbandona l'idea di "spazio assoluto" e si accetta che le leggi della fisica siano identiche in ogni sistema di riferimento che si muova a velocità costante, si deve anche abbandonare l'idea che il tempo possa essere misurato "assolutamente", in qualsiasi senso: lo spazio e il tempo sono intimamente connessi. In quello stesso anno Einstein propose che la luce fosse quantizzata in "pacchetti" di energia (i fotoni) e sviluppò pure la teo-

ria del moto browniano, il processo cioè per cui gli impatti casuali delle molecole di un liquido fanno muovere a zig zag un corpuscolo di polvere che vi si trovi dentro. Questi contributi, da soli, sarebbero bastati a collocare Einstein in quella mezza dozzina dei grandi pionieri della fisica del XX secolo.

Ma è la sua teoria della gravitazione, la relatività "generale", promulgata dieci anni dopo, che fa di Einstein un caso a sé stante. Anche se non avesse scritto nessuno degli articoli pubblicati nel 1905, non sarebbe passato molto tempo che gli stessi concetti sarebbero stati avanzati da questo o quello dei suoi contemporanei: le idee erano, come si dice, nell'aria; ben note incoerenze delle teorie precedenti e risultati sperimentali che costituivano veri e propri "rompicapo" avrebbero comunque focalizzato l'interesse su questi problemi. Anche se Einstein non fosse esistito, non c'è dubbio che, nel giro di pochi anni, le intuizioni contenute in quei suoi primi articoli qualcun altro le avrebbe avute e che quei risultati sarebbero stati ottenuti, molto probabilmente, da tre ricercatori diversi. Ciò che è stupefacente è il fatto che furono pubblicati, tutti nello stesso anno, da uno sconosciuto impiegato dell'Ufficio Brevetti di Berna.

Ma la concezione di Einstein della gravità in termini di incurvamento dello spazio (di modo che "Lo spazio dice alla materia come muoversi, la materia dice allo spazio come incurvarsi") lo fece riconoscere come il più grande fisico mai esistito dai tempi di Newton. Questa teoria, che richiese quasi dieci anni di gestazione, non rispondeva a nessun particolare enigma generato dai risultati delle osservazioni. È vero che dava conto di annose anomalie dell'orbita di Mercurio, ma Einstein vi arrivò grazie al puro pensiero e a una profonda intuizione. Lui stesso diceva, annunciando il suo nuovo lavoro: "Difficilmente chi comprenderà questa teoria, potrà sfuggire al fascino della sua magia". La sua logica interna gli sembrava così cogente che non sentì un gran bisogno di difenderla dalle critiche. In effetti, la nuova concezione della gravità che Einstein proponeva fu ampiamente (anche se tacitamente) accet-

tata, prima ancora che potessero venir controllate le sue principali conseguenze.

La visione di Einstein

La capacità di visione scientifica richiede un grande sforzo di concentrazione e di preparazione. È così anche a livello di lavori di *routine*, non solo quando si scalano le vette su cui si elevarono Newton e Einstein. Richiede anche intuito e immaginazione. Da questo punto di vista, ricorda l'ispirazione artistica – che è anch'essa un tentativo di cercare nuove figure e nuove prospettive sul mondo. Ma queste somiglianze non dovrebbero oscurare una differenza ben più vistosa fra queste due imprese, differenza che deriva dal carattere interconnesso, cumulativo e intensamente sociale dell'attività scientifica. Nelle arti, l'impronta individuale risplende anche a livello del dilettante. Tutti i contributi, anche se vengono velocemente dimenticati, sono personali e caratteristici del loro autore. Come notava Peter Medawar, quando Wagner, nel bel mezzo del ciclo dell'*Anello del Nibelungo*, si prese dieci anni di vacanza per comporre *I maestri cantori* e *Tristano e Isotta*, non aveva da preoccuparsi che qualcuno gli soffiasse sotto il naso *Il crepuscolo degli Dei*.

I progressi scientifici, anche quando sono sostanziali e durevoli, in genere vanno a fondersi quasi anonimamente nell'edificio della "conoscenza pubblica". L'impronta personale dei singoli scienziati può svanire; ma, in compenso, se sopravvive all'esame critico, il loro lavoro rimarrà. E hanno anche una seconda compensazione. I critici letterari e artistici raramente sono essi stessi artisti creativi; ma ogni ricercatore è, anche se in misura ridotta, al tempo stesso creatore e critico dell'impresa della scienza.

Le scoperte, in genere, emergono quando il tempo è maturo. Raramente gli individui danno un contributo che comporti più di qualche anno di differenza nel verificarsi di questo o quel progresso. Ci sono eccezioni, certo. Per esempio, Char-

les Townes, uno degli inventori del *maser*, ha sostenuto che i maser avrebbero potuto essere realizzati parecchi anni prima; e, per fare un esempio di natura del tutto diversa, i concetti della sociobiologia avrebbero potuto venir completamente sviluppati durante gli anni Venti. Einstein rappresenta un *unicum* fra gli scienziati del XX secolo in quanto il suo lavoro mantiene l'impronta individuale che lui gli diede; senza di lui avremmo potuto attendere decenni interi perché si arrivasse a intuizioni equivalenti sulla natura della gravità. Il che rende la sua personalità e il suo stile singolarmente interessanti.

La documentazione sulla vita di Einstein era, fino a poco tempo fa, notevolmente scarsa a confronto dell'importanza della sua figura. Pubblicò un'autobiografia, ma in essa schivava quasi completamente ogni argomento che fosse, come diceva, "puramente personale". Dopo la sua morte – 1955 – i suoi esecutori letterari furono piuttosto riluttanti a lasciar circolare materiali che potessero inquinare un'immagine ormai romantica. La pubblicazione delle sue opere complete fu punteggiata da ritardi e difficoltà. Il punto saliente della prima parte, che non fu pubblicata fino al 1987, è la corrispondenza di Einstein con Mileva Marič, che fu poi la sua prima moglie. Era una studentessa-ricercatrice di origine ungherese, del Politecnico Federale di Zurigo, uno dei pochi centri scientifici importanti che fossero allora aperti alle donne.

Il giovane Einstein non ebbe subito successo nel trovare un posto regolare. Aveva osteggiato il suo professore, i pregiudizi antisemiti costituivano un ulteriore handicap. Dopo due anni di insegnamento più o meno occasionale in varie scuole pubbliche e private, la sua assunzione come "perito tecnico di terza classe" presso l'Ufficio Brevetti di Berna gli diede una qualche sicurezza. Le lettere di Einstein a Mileva sono costellate di commenti su problemi di fisica; a volte si parla anche del "nostro lavoro". La maggior parte degli studiosi non ritengono fondata l'affermazione che Mileva Marič dovrebbe essere considerata la coscopritrice della relatività (se fosse vero, non sarebbe però il primo caso di donne scientificamente impegnate cui è negato il dovuto riconoscimento;

e nemmeno, triste a dirsi, l'ultimo). La principale cassa di risonanza delle idee contenute nei suoi primi articoli fu Michele Besso: un'amicizia che durò tutta la vita. Avevano messo su un gruppo di discussione informale, che chiamavano scherzosamente l'Accademia Olimpica. (Einstein, anni dopo, la ricordava come "assai meno infantile di quelle rispettabili che mi sono trovato poi a frequentare".) Ma il suo isolamento dalla fisica accademica non fu mai totale. Né durò molto a lungo: era già professore quando, da poco trentenne, meditava la gestazione della sua teoria della relatività generale.

Persino i maggiori scienziati raramente diventano delle celebrità. Negli anni in cui si trovava al vertice della creatività Einstein era ancora poco noto al grande pubblico. Ma nel 1919 la situazione cambiò, quando le misurazioni compiute nel corso di un'eclissi di Sole sembrarono confermare che i raggi di luce venivano leggermente incurvati, come aveva predetto, dalla gravità del Sole. L'eminenza grigia che aveva promosso queste osservazioni era stato Arthur Eddington, astrofisico di Cambridge meglio noto per le sue ricerche sulla natura delle stelle, che fu fra i primi a comprendere e ad apprezzare la natura della nuova teoria.

L'interesse dei mezzi di informazione nei confronti della scienza è sempre capriccioso, ma questi arcani risultati astronomici scatenarono uno straordinario entusiasmo nella stampa; LE IDEE DI NEWTON SONO STATE ROVESCIATE, titolava il *Times*; e due giorni dopo il *New York Times*: LA LUCE DEL CIELO È SGHEMBA: ECCITAZIONE FRA GLI SCIENZIATI [...] TRIONFA LA TEORIA DI EINSTEIN.

Dopodiché, la vita di Einstein non poté più essere la stessa; era sempre sotto gli occhi del pubblico. In Germania, dove rimase fino ai primi anni Trenta, dovette misurarsi con gli attacchi alla "scienza giudaica". Sul fronte internazionale, sostenne il Sionismo, la Lega delle Nazioni e (nei suoi ultimi anni) il disarmo nucleare. Sembra che amasse la fama, contento com'era di farsi fotografare insieme a Charlie Chaplin e altre celebrità dell'epoca. Fu una fortuna per la scienza, e non solo per i giornalisti a caccia di battute da citare, che questo suo

eminente esponente desse di sé un'immagine così coinvolgente e idealistica.

Nel 1936 Einstein fu esiliato irrevocabilmente dall'Europa; inoltre, le condizioni di suo figlio Eduard, che soffriva di schizofrenia, andavano peggiorando. Momenti desolati, in cui scriveva che "finché potrò lavorare non devo lamentarmi, né lo farò, perché il lavoro è l'unica cosa che dia sostanza alla vita". Lo stoicismo è ammirevole solo quando la disgrazia che ci colpisce è sentita tanto profondamente quanto dovrebbe esserlo; e spesso si è discusso della profondità del coinvolgimento emotivo di Einstein. Ma senza un simile distacco Einstein non sarebbe mai riuscito a sostenere la concentrazione che il suo lavoro gli richiedeva. Per arrivare alla sua profondità di visione, aveva bisogno, come Newton, "di pensare a esso in continuazione".

Newton passò i suoi ultimi anni come "Master of the Mint", cioè capo della Zecca di Londra. Un posto da dignitario, più che da ricercatore (anche se, in questa posizione, i suoi esperimenti alchemici si rivelarono forse non del tutto irrilevanti). Per contro, la motivazione intellettuale di Einstein non venne mai meno – lavorò, e calcolò fino all'ultimo. Alcune delle idee di Einstein evocavano una quinta dimensione (oltre al tempo e alle tre dimensioni dello spazio ordinario) per rappresentare le forze magnetiche ed elettriche. Era infatti alla ricerca di ciò che oggi chiameremmo una teoria unificata. Le forze che tengono insieme i nuclei atomici non erano ancora state scoperte e quindi, retrospettivamente, questa sua ricerca era chiaramente prematura (come forse lo è ancor oggi) e lo marginalizzò rispetto alla corrente principale della fisica per gli ultimi trent'anni della vita.

L'immagine che abbiamo tutti in mente, l'icona dei poster e delle magliette, dipinge l'Einstein ormai vecchio: un benigno saggio tutto spettinato. Un forte contrasto con quei giovani turbolenti e volitivi che rivoluzionarono la fisica.

Richard Westfall, nella prefazione alla sua ormai classica biografia di Newton, scrive che, quanto più lo studiava, tanto più Newton gli sembrava "allontanarsi da me". Nel pantheon

delle divinità scientifiche Einstein è secondo forse solo a Newton, ma la sua personalità ci appare molto meno estranea. Le sue lettere e articoli, recentemente pubblicati, riaggiustano l'igienica mellifluità delle prime biografie e illuminano la vita privata che si svolgeva dietro le quinte dei suoi risultati straordinari.

Siccome la relatività generale venne proposta con tanto anticipo rispetto a una qualsiasi applicazione reale, essa rimase, per più di quarant'anni dalla sua scoperta, un severo monumento intellettuale, un argomento un po' sterile, isolato dallo sviluppo principale della fisica e dell'astronomia. Il che è in stridente contrasto con lo status che ha acquisito più recentemente: oggi costituisce una delle frontiere più vive della ricerca di base. La sua reputazione di essere eccezionalmente difficile da capire è sempre stata esagerata. (Fu chiesto ad Arthur Eddington se lui fosse davvero una delle tre sole persone al mondo che capivano la relatività generale. Si dice che esitasse a rispondere, non per modestia, ma perché non riusciva a immaginare chi potesse essere la terza.) Ma oggi viene insegnata comunemente nelle università, insieme alla meccanica quantistica, all'elettromagnetismo e al resto del *menu* dei corsi offerti agli studenti di fisica.

Ma nel nostro universo dov'è che la gravità è abbastanza forte da rivelare le conseguenze caratteristiche della teoria di Einstein? Vale la pena che ci poniamo questa domanda prima di addentrarci ulteriormente in questa teoria.

Dove la gravità è forte: le stelle di neutroni

All'interno del Sole la spinta che la gravità esercita verso l'interno è equilibrata dalla pressione del suo nucleo caldissimo. Se la pressione centrale cessasse, il Sole imploderebbe su se stesso in caduta libera, dimezzando le sue dimensioni in meno di un'ora. Se, d'altra parte, si potesse magicamente spegnere la gravità, il nucleo caldo esploderebbe quasi istantaneamente, disperdendosi. Il Sole, come la maggior parte delle

altre stelle, si trova quasi in equilibrio. La pressione equilibra la gravità, e la fusione nucleare che avviene nel nucleo genera esattamente l'energia sufficiente per rimpiazzare il calore che viene disperso alla superficie.

Le stelle più pesanti spendono la loro energia più rapidamente, e finiscono la loro vita come supernove – le esplosioni i cui resti, dispersi nello spazio interstellare, hanno un'importanza cruciale nei processi di riciclaggio stellare che sintetizzano tutti gli elementi della tavola periodica.

Prima che ci si rendesse conto del ruolo delle supernove nell'ecologia delle galassie (vedi capitolo 1), c'erano speculazioni e ipotesi su come potessero esplodere le stelle e che residui potessero lasciare dietro di sé. La prima congettura corretta sulle supernove risale a più di sessant'anni fa. In un breve articolo del 1934 Walter Baade (astronomo dell'osservatorio di Monte Wilson) e il suo collega Fritz Zwicky scrivevano: "Con tutte le riserve del caso, avanziamo l'ipotesi che una supernova rappresenti la transizione da una stella ordinaria a una stella di neutroni, costituita cioè principalmente da neutroni". Baade e Zwicky pensavano che l'esplosione di una supernova fosse provocata dall'energia gravitazionale rilasciata tutt'a un colpo con il collasso della stella e che dovesse pur rimanere un qualche residuo. Già si sapeva che i nuclei pesanti degli atomi erano piccoli a confronto degli atomi stessi, le cui dimensioni globali (e le loro distanze, nei solidi ordinari) sono stabilite da una diffusa nube di elettroni che circondano il nucleo. In una "stella di neutroni", postulavano Baade e Zwicky, i nuclei stessi devono risultare fortemente ravvicinati e addensati. L'intero contenuto della stella verrebbe allora pigiato in un raggio di una decina di chilometri, una densità milioni di volte maggiore persino di quella delle nane bianche. Il volume di una zolletta di zucchero conterrebbe centinaia di milioni di tonnellate di questo materiale di una stella di neutroni.

Ma perché i neutroni? I nuclei degli atomi ordinari sono fatti di protoni e neutroni. Per esempio, l'elio ha un nucleo con due protoni (ciascuno dei quali con carica elettrica positiva) e due neutroni (senza carica elettrica); il ferro ha 26 protoni e 30 neutroni. In laboratorio, un neutrone isolato è instabile e decade spontaneamente in un protone e un elettrone. D'altro canto, a livelli di densità estremi, il processo prende la strada opposta: i protoni si trasformano in neutroni.

Zwicky fu il primo astronomo a ricercare sistematicamente le supernove nelle altre galassie e a classificarle in una tipologia. Continuò a speculare sulle stelle di neutroni, ma, nonostante le sue notevolissime intuizioni, non conosceva abbastanza fisica per elaborare i dettagli. Una persona che sicuramente possedeva le competenze necessarie era invece Robert Oppenheimer. Prima della sua famosa partecipazione al progetto Manhattan, da cui sarebbe uscita la prima bomba atomica, Oppenheimer aveva guidato un vivace gruppo di ricerca presso la University of California; insieme con il suo studente George Volkoff, utilizzò il meglio delle conoscenze di fisica atomica dell'epoca per calcolare a cosa sarebbe dovuta assomigliare una stella di neutroni.

Ma nonostante questo interesse teorico (che risaliva alla fine degli anni Trenta), la congettura di Baade e Zwicky era destinata a rimanere tale fino al 1968, quando si scoprì che una piccola stella della Nebulosa del Granchio dall'aspetto del tutto ordinario emetteva invece lampi di luce trenta volte al secondo. Che razza di oggetto astronomico era, per comportarsi in questo strano modo?

Pulsar

Il residuo scoperto nella Nebulosa del Granchio non era la prima stella di neutroni scoperta. La priorità toccò ad Anthony Hewish e a Jocelyn Bell, radioastronomi di Cambridge, che scoprirono le *pulsar*. La loro scoperta costituisce uno dei più notevoli casi di "serendipità" della scienza contemporanea.

Hewish aveva costruito uno speciale strumento che aveva un'importante caratteristica: era abbastanza sensibile da registrare *cambiamenti rapidi* dell'intensità della radiazione pro-

veniente da sorgenti lontane.[1] E scoprì cosa andava cercando: esattamente come le stelle, che brillano scintillando nel cielo perché la loro luce passa attraverso le turbolenze dell'aria, alcune radio sorgenti "scintillano" perché le onde radio passano attraverso un mezzo irregolare lungo il cammino per arrivare sino a noi. Ma una sua studentessa-ricercatrice, Jocelyn Bell, trovò variazioni di tipo assai caratteristico: una serie sporadica di impulsi regolari, ciascuno dei quali durava solo una frazione di secondo, provenienti da certi punti specifici del cielo. Seguirono settimane di lavoro frenetico. I radioastronomi di Cambridge dovevano controllare che i segnali non avessero un'origine terrestre (magari potevano provenire da un qualche progetto spaziale segreto!). Vennero ben presto trovate altre tre sorgenti misteriose, ciascuna delle quali emetteva impulsi radio a frequenze ben definite. Che si trattasse di segnali provenienti da extraterrestri intelligenti? Bell e Hewish non presero mai questa idea del tutto sul serio, ma, scherzosamente, battezzarono comunque le loro sorgenti LGM 1, 2, 3 e 4 (ovvero "Little Green Men", omini verdi).

Quando la loro scoperta fu annunciata su *Nature*, persino gli altri astronomi di Cambridge rimasero stupefatti. Hewish e colleghi non avevano comunicato la loro eccitazione a nessuno che non facesse parte del loro gruppetto molto chiuso. Alcuni di noi ne rimasero all'epoca alquanto seccati, ma retrospettivamente penso che Hewish abbia fatto benissimo a essere prudente. Erano passati solo pochi mesi fra le prime rivelazioni che gli aveva fatto Jocelyn Bell e la pubblicazione effettiva, e così nessuno poteva lagnarsi che non gli fosse stata data la possibilità di seguire il lavoro. E, per la maggior parte di questi mesi, Hewish e Bell non erano stati affatto sicuri che i segnali fossero davvero "reali". Se si fosse scoperto che quegli sporadici impulsi radio avevano una intepretazione molto più terra terra, o che derivavano da un qualche difetto della loro attrezzatura tecnica, un annuncio prematuro non solo si sarebbe trasformato in una cosa piuttosto imbarazzante, ma avrebbe potuto portare a uno spreco di fatiche da parte di molti altri

astronomi che si sarebbero, senz'ombra di dubbio, gettati a studiare un segnale di questo tipo.[2]

Che razza di oggetti potevano essere? Una stella ordinaria come il Sole verrebbe fatta a pezzi se ruotasse o pulsasse con un ritmo molto più rapido di una rotazione o una pulsazione all'ora. Corpi che si accendevano e si spegnevano in una frazione di secondo dovevano essere chiaramente molto più compatti. Che fossero nane bianche, o forse stelle di neutroni? Pulsavano o ruotavano? Tutte queste opzioni (e svariate altre) avevano i loro sostenitori. Il gruppo di Cambridge sosteneva originariamente che fossero stelle, nane bianche pulsanti. (A una conferenza stampa un ingenuo e perplesso interrogante chiese come si potesse distinguere, a distanze così enormi, una nana bianca da un omino verde.)

Il primo a sostenere con chiarezza la causa delle stelle di neutroni rotanti fu Thomas Gold (di cui abbiamo parlato nel capitolo 2 come coinventore della cosmologia dello stato stazionario; in questo periodo si era trasferito alla Cornell University, negli Stati Uniti). C'erano buone ragioni per aspettarsi che si formassero stelle di neutroni quando i nuclei delle stelle di grande massa collassano, scatenando l'esplosione delle supernove. Sarebbero state così piccole e avrebbero avuto una gravità così forte che avrebbero potuto ruotare alla velocità di migliaia di giri al secondo senza finire in pezzi. La velocità di rotazione avrebbe fornito un orologio naturale stabile; una specie di faro ancorato a una stella, che ci avrebbe inviato un intenso impulso a ogni rotazione.

Appena un anno dopo il dibattito si chiudeva, e a favore di Gold. Nel centro della Nebulosa del Granchio fu scoperta una pulsar che trasmetteva 30 impulsi al secondo: una nana bianca non avrebbe mai potuto ruotare o pulsare con quella frequenza, ma una rotazione così rapida non avrebbe costituito un problema per una stella di neutroni. Un attento conteggio dei segnali mostrò inoltre che la frequenza degli impulsi andava gradualmente rallentando: il che sarebbe risultato naturale se l'energia immagazzinata nella rotazione della stella si fosse andata gradualmente trasformando in radiazione e in un

vento di particelle che facevano brillare di luce azzurra la Nebulosa del Granchio.

Le prime ipotesi di Baade e Zwicky trovavano pienamente conferma. A Zwicky piaceva moltissimo citare un succinto sommario delle sue idee pubblicato su una striscia a fumetti del *Los Angeles Times*, "Be Scientific with Ol' Doc Dabble" ("Scienziato anche tu col vecchio dott. Dabble"). Nel gennaio 1934 la didascalia diceva: "'I raggi cosmici sono causati da stelle che esplodono in una fiammata pari a 100 milioni di soli, e che poi si restringono da un diametro di mezzo milione di miglia a piccole sfere di appena 14 miglia di spessore', dice il prof. Fritz Zwicky, fisico svizzero". Più di trent'anni dopo Zwicky avrebbe ben potuto esclamare "Non ve l'avevo detto?"

Stelle di neutroni

Persino gli scienziati che non sentono il desiderio di esplorare il cosmo di per sé, sono però interessati alle parti del nostro ambiente in cui le condizioni sono veramente estreme. Ne sono un bell'esempio le esplosioni delle supernove e i loro residui: le stelle di neutroni.

Le stelle di neutroni ci offrono un affascinante laboratorio cosmico per studiare condizioni di gran lunga più estreme di quelle che potremo mai simulare sulla Terra. Una sezione di una stella di neutroni assomiglierebbe a una del nostro pianeta: una crosta, un interno liquido e forse un nucleo solido. La crosta esterna dovrebbe essere fatta principalmente di ferro; più in profondità, la pressione è così alta che i nuclei si fondono in un fluido neutronico, dotato di quelle stesse inusuali proprietà dell'elio a temperature superiori di pochi millesimi di grado allo zero assoluto: un "superfluido", che può scorrere senza nessuna resistenza.

Di primo acchito, sembrerebbe un'impresa disperata pensare di poter controllare le nostre idee sull'interno di una stella di neutroni, dato che ne siamo così lontani. Ma, sorprendentemente, lo possiamo fare. Si può prendere il tempo della pulsar con un'approsimazione superiore al microsecondo. In media i loro impulsi vanno rallentando, ma occasionalmente ci sono come degli "scatti" [*glitches*], degli improvvisi aumenti della loro frequenza che accelera, anche se di pochissimo. C'è una ragione semplice per aspettarci questi scatti. Proprio come la Terra non è una sfera perfetta, ma presenta un rigonfiamento intorno all'equatore, anche una stella di neutroni in rotazione deve avere una forma simile. Via via che la rotazione rallenta, il rigonfiamento equatoriale diminuisce. Se la stella fosse interamente fluida, la forma si riaggiusterebbe in continuazione. Ma siccome la crosta è rigida, la tensione cresce fino a spezzarla improvvisamente: uno stellamoto. L'ampiezza e la frequenza di questi stellamoti ci dicono quanto è spessa e rigida la crosta. Un movimento anche di pochi micron (un millesimo di millimetro) perturba la frequenza di rotazione della stella al punto di poter essere chiaramente rilevabile nelle osservazioni. È stupefacente che ci possiamo rendere conto di questi effetti microscopici in stelle distanti migliaia di anni luce da noi.

Questi aumenti improvvisi della frequenza delle pulsar sono stati studiati in dettaglio, e si crede oggi che i più comuni derivino da un effetto di altro tipo; e precisamente lo scorrimento del nucleo interno, fluido, contro la crosta, solida. L'attrito che rallenta la rotazione di una pulsar è applicato alla crosta e non rallenta direttamente il nucleo liquido interno. Il nucleo sfrega così contro la crosta che ruota più lentamente di lui e viene rallentato dall'attrito. Questa forza non agisce in modo continuo, però; opera invece a scatti, un po' come la frizione di un'automobile ormai logorata, e, ogni volta che l'attrito aumenta improvvisamente, la crosta accelera.

Lo studio preciso di come cambi la loro velocità di rotazione è solo uno dei modi con cui possiamo studiare l'interno di una stella di neutroni: l'astrogeologia, a differenza dell'astrologia, può essere un serio campo di studio.

L'aspetto delle stelle di neutroni che rimane più enigmatico ancor oggi è – ironicamente – proprio quell'intensa emis-

sione radio che permise a Hewish e a Bell di scoprirle. È quasi certo che ci sia in gioco un forte campo magnetico – come quello terrestre, ma molti miliardi di volte più intenso. Ma, di nuovo, come nel caso della Terra il cui nord magnetico non coincide con quello vero, l'asse magnetico non è allineato con l'asse di rotazione. L'emissione radio, legata all'orientazione del campo magnetico, spazza in giro per il cielo, irradiando anche nella nostra direzione e dandoci un radioimpulso a ogni rotazione.

Sono oggi note circa un migliaio di pulsar. Ciascuna di esse è come un faro lampeggiante che segnala la morte di grandi stelle, avvenuta (nella maggior parte dei casi) milioni di anni fa. La maggior parte di esse ruota molto più lentamente della pulsar del Granchio, coerentemente col fatto che vanno rallentando con l'età.[3] I resti espulsi con l'esplosione della supernova – la "spazzatura nucleare" prodotta dalla stella progenitrice – sono andati dispersi molto tempo fa nello spazio interstellare.

Le stelle di neutroni sono estreme anche per l'intensità della loro *gravità*. Essa è pari a 10^{12} volte quella terrestre. Le loro superfici dovrebbero essere completamente lisce; nessuna montagna potrebbe superare il millimetro di altezza. Ma la gravità è così forte che occorrerebbe più energia per scalare queste millimetriche vette di quanta ce ne voglia per sfuggire completamente alla gravità terrestre. Qui sulla Terra una penna che casca da un tavolo fa appena appena rumore; lasciata cadere dalla stessa altezza su una stella di neutroni rilascerebbe l'energia di una tonnellata di esplosivo ad alto potenziale. Per riuscire a lasciare una stella di neutroni occorrerebbe un missile capace di muoversi a metà della velocità della luce (150.000 chilometri al secondo; la velocità di fuga dalla Terra è 11 chilometri al secondo).[4]

Nel nostro sistema solare la gravità incurva appena i raggi di luce: occorrono anzi misurazioni molto precise per rilevare questo effetto. Ma in prossimità di una stella di neutroni l'incurvamento della luce dovrebbe raggiungere i 10-20 gradi, un effetto abbastanza importante per distorcere la visione. Nessuna struttura potrebbe sfuggire all'essere completamente schiacciata a livello della superficie della stella, l'unico modo per osservare l'incurvamento sarebbe quello di studiarlo da una sonda spaziale orbitante. Ma anche da questo punto di osservazione verreste stiracchiati malamente: è vero che la gravità si andrebbe facendo più debole con la distanza, ma la differenza fra l'attrazione gravitazionale sul pavimento e sul soffitto della sonda (la forza di "marea") sarebbe decisamente considerevole.

Prima di lasciare le pulsar, vorrei arrischiare due speculazioni, due "cosa-sarebbe-successo-se" di tipo storico. La pulsar della Nebulosa del Granchio può essere vista con tutti i telescopi abbastanza grandi. Emette impulsi di luce visibile oltre che onde radio. Ma la frequenza degli impulsi, 30 al secondo, è così elevata che l'occhio umano la vede come se fosse una sorgente luminosa costante. Se questa pulsar ruotasse più lentamente – diciamo 10 volte al secondo – le notevolissime proprietà della piccola stella della Nebulosa del Granchio sarebbero state scoperte settant'anni fa. Come sarebbe cambiato il corso della storia della fisica del XX secolo se la materia superdensa fosse stata scoperta negli anni Venti, prima che si scoprissero i neutroni qui sulla Terra? Difficile da dire. Si può però pensare che l'importanza dell'astronomia per la fisica fondamentale sarebbe stata riconosciuta molto prima.

Un altro appuntamento mancato si verificò nel 1964, quando Hewish e un suo studente ricercatore, il nigeriano Sam Okoye, scoprirono – senza saperlo – la pulsar della Nebulosa del Granchio. In effetti, non arrivarono a registrare gli impulsi, ma mostrarono che l'emissione radio proveniente dal centro della Nebulosa del Granchio proveniva da un nuovo tipo di sorgente, più piccola di tutte quelle fino allora conosciute. Percorrendo questa strada fino in fondo, avrebbero potuto scoprire anche l'emissione di impulsi. Se la storia fosse andata in questo modo, la pulsar del Granchio sarebbe stata la prima stella di neutroni a essere scoperta. Hewish sarebbe sempre il coscopritore delle pulsar, ma l'avrebbe fatto quattro anni prima e con Sam Okoye invece che con Jocelyn Bell.

Raggi X dalle stelle di neutroni

Le stelle di neutroni sono state scoperte grazie a un caso fortunato. Nessuno si aspettava che fossero delle pulsar, dotate di una forte e caratteristica emissione radio, cosicché non ne era stata fatta nessuna ricerca sistematica con mezzi radioastronomici. Se fosse stato chiesto ai teorici dei primi anni Sessanta quale potesse essere la via migliore per poter scoprire una stella di neutroni, la maggior parte di loro non avrebbe saputo che pesci pigliare; e quelli che si fossero azzardati a rispondere avrebbero suggerito di ricercare un'emissione di *raggi X*. Il motivo è semplice. Se le stelle di neutroni irradiano altrettanta energia di una stella ordinaria, ma da una superficie molto più piccola, devono essere parecchio più calde: abbastanza calde da emettere radiazioni non nella banda blu dello spettro, e nemmeno nell'ultravioletto, ma nella banda nota come raggi X. Per un fisico i raggi X (come le onde radio, la luce, la luce ultravioletta) sono un tipo di onde elettromagnetiche, ma con lunghezze d'onda più corte e con oscillazioni più veloci e più ricche di energia. *Ci sarebbe stato da aspettarsi*, dunque, che non fossero i radioastronomi a poter scoprire le stelle di neutroni, ma i *"raggi X-astronomi"*.

I raggi X provenienti da oggetti cosmici vengono assorbiti dall'atmosfera della Terra e possono dunque essere osservati solo dallo spazio. L'astronomia basata sui raggi X, come la radioastronomia, ebbe la spinta iniziale dalle tecnologie e dall'esperienza sviluppatesi durante la Seconda Guerra Mondiale. In questo caso, però, furono gli scienziati americani a prendere la guida; e specialmente Herbert Friedman e i suoi colleghi del Naval Research Laboratory americano. I primi rivelatori di raggi X erano montati su missili, e producevano dati utili solo per pochi minuti, prima di schiantarsi al suolo.

Il gruppo di Friedman eseguì nel 1964 un esperimento rimasto famoso. Lanciarono un missile proprio nel momento in cui la Luna stava per occultare la Nebulosa del Granchio. Se i raggi X fossero stati emessi dall'intera nebulosa, sarebbero andati svanendo gradualmente via via che il disco lunare l'a-

vesse nascosta; se invece fossero provenuti da una sorgente puntiforme, situata al centro della nebulosa (una stella di neutroni?) l'emissione si sarebbe arrestata improvvisamente. Friedman osservò una dissolvenza *graduale*; e l'interpretò come una prova che i raggi X provenissero principalmente dal materiale che risplendeva diffusamente di luce azzurra. Oggi sappiamo che una parte dei raggi X proviene effettivamente dalla pulsar, ma Friedman ebbe la sfortuna che questi raggi X ammontassero a solo il dieci per cento dell'emissione totale e le sue attrezzature non erano abbastanza sensibili per poterli rilevare.

L'astronomia a raggi X ricevette slancio dalla rivalità fra le due superpotenze in campo spaziale e nucleare. Ma ebbe una spinta in avanti decisiva quando, nel 1970, la NASA lanciò il primo satellite per rilevare raggi X, che poteva raccogliere in pochi minuti così tanti dati che, prima, ci sarebbero voluti anni interi. Questo piccolo satellite fu costruito e fatto funzionare da un gruppo di ricerca diretto da Riccardo Giacconi, un fisico italiano stabilitosi negli Stati Uniti: questi pionieri di un nuovo campo dell'astronomia di fatto lavoravano per l'American Science and Engineering, il cui principale cliente era il Dipartimento della Difesa americano. I loro primi strumenti, infatti, erano stati costruiti per rilevare i raggi X provenienti da test termonucleari. Il gruppo di Giacconi si trasferì in seguito alla Harvard University e allo Smithsonian Observatory, dove costruì telescopi a raggi X più grandi; mentre la sua vecchia società riconvertiva la produzione, orientandosi verso prodotti più mondani, tipo gli *scanner* a raggi X utilizzati per controllare i bagagli negli aeroporti.

Il satellite di Giacconi fu lanciato da una base del Kenia. Era stato battezzato *Uhuru*, "libertà", in lingua swahili. Lo scopo dichiarato dell'*Uhuru* era quello di scoprire sorgenti di raggi X fuori dalla nostra galassia. Da questo punto di vista (ma solo da questo) il progetto si rivelò fallimentare rispetto alle aspettative; furono scoperti meno ammassi di galassie e meno quasar di quanto non si fosse previsto. Il suo principale risultato, però, fu di rilevare emissioni di raggi X totalmente

inaspettate provenienti dall'interno della nostra Galassia. Impulsi ripetitivi, con periodi di pochi secondi, provenivano da oggetti situati su orbite che quasi sfioravano stelle relativamente ordinarie. Queste sorgenti sono, come le radio pulsar, stelle di neutroni in rotazione. La loro radiazione è però prodotta in modo molto diverso. Il gas della stella-compagna viene attratto dalla forte gravità della stella di neutroni, che ne cattura una parte che si schianta sulla sua superficie a una velocità pari alla metà di quella della luce. L'energia liberata nell'impatto viene irradiata sotto forma di raggi X. Il flusso di gas verso la stella di neutroni è incanalato dai campi magnetici, cosicché il gas atterra preferenzialmente in prossimità dei poli magnetici. I raggi X osservati provengono dai "punti caldi" intorno ai poli magnetici e sono dunque modulati dal periodo di rotazione della stella.

La cronologia con cui le stelle di neutroni sono state effettivamente scoperte sembra, retrospettivamente, alquanto arbitraria. L'andamento avrebbe potuto facilmente venire invertito o sistemarsi comunque in un ordine diverso. Se l'esperimento del 1964 fosse stato un po' più sensibile, Friedman avrebbe scoperto che il dieci per cento dei raggi X emessi dalla Nebulosa del Granchio provenivano in effetti da una sorgente puntiforme centrale e la prima stella di neutroni a essere scoperta sarebbe stata quella del Granchio. (Il che sarebbe potuto accadere persino prima dell'appuntamento mancato di Hewish e Okoye.) D'altro canto, se Jocelyn Bell fosse stata meno percettiva, le stelle di neutroni non sarebbero state notate fino al lancio dell'*Uhuru* – e allora gli oggetti pulsanti appartenenti a sistemi binari sarebbero stati rapidamente identificati come stelle di neutroni.

La teoria di Einstein alla prova

La relatività generale di Einstein è oggi sostenuta da prove molto solide. Fino agli anni Sessanta, non era noto nessun oggetto che possedesse una gravità "forte". E gli esperimenti

che cercavano di registrare lievi scostamenti dalla teoria newtoniana all'interno del sistema solare erano così imprecisi da lasciare in campo svariate teorie alternative. Oggi, però, le orbite dei pianeti sono state misurate con più precisione grazie al radar; si possono seguire le orbite delle sonde spaziali con precisione anche maggiore; e i radioastronomi possono migliorare le misurazioni ottiche dell'incurvamento dei raggi luminosi dovuto alla gravità del Sole. Queste tecniche hanno confermato la relatività generale con un'approssimazione migliore di un millesimo e hanno eliminato la maggior parte delle sue rivali.

Un "terreno di coltura" anche migliore per controllare la teoria è stato scoperto da Russell Hulse e da Joseph Taylor nel 1974. Si tratta di un oggetto notevolissimo: una pulsar binaria. In questo sistema una pulsar orbita intorno a un'altra stella di neutroni compiendo una rivoluzione ogni otto ore. Siccome si tratta di un'orbita molto più piccola e stretta di quelle dei pianeti del nostro sistema, le deviazioni dalla gravità newtoniana sono più sostanziose. Secondo la teoria di Einstein, l'orbita di Mercurio dovrebbe avere una piccola (ma misurabile) precessione. L'analoga precessione dell'orbita di questa pulsar binaria è diecimila volte più veloce. Taylor, nel corso di vent'anni, è andato eseguendo misure di questo sistema sempre più precise. Non solo ha registrato la precessione, ma ha scoperto che l'orbita si va gradualmente restringendo. Il che conferma il fenomeno della radiazione gravitazionale, un'altra delle predizioni della teoria di Einstein. Ogni sistema in movimento la cui gravità vada cambiando genera lievi vibrazioni dello spazio stesso che trasportano via la sua energia. Questo effetto, certamente troppo piccolo per poter esser rilevato all'interno del sistema solare, si mostra chiaramente nella pulsar binaria.

La teoria di Einstein può venir sottoposta a controlli anche in altri modi: per esempio, alcuni scienziati della Stanford University hanno costruito un giroscopio estremamente preciso che sperano di poter sistemare in orbita intorno alla Terra, per poter rilevare un lieve ma caratteristico effetto di pre-

cessione predetto dalla relatività generale. L'esperimento venne proposto per la prima volta negli anni Sessanta e le argomentazioni a favore erano allora ben forti. Paradossalmente, si sono indebolite col rafforzarsi delle prove a favore della relatività generale. Se l'esperimento ottenesse un risultato che concordasse con le previsioni einsteiniane, la maggior parte dei ricercatori non se ne stupirebbe più di tanto. Ma, se ne derivasse una discrepanza, ben pochi sarebbero quelli che abiurerebbero la loro fede in Einstein; la maggioranza sospenderebbe il giudizio fino a che questo nuovo e tecnicamente problematico esperimento non venisse ripetuto indipendentemente. Il risultato più eccitante sarebbe una richiesta di fondi per rifare tutto daccapo!

Le accurate verifiche delle piccole deviazioni dalla teoria newtoniana, i cosiddetti effetti post-newtoniani, rinforzano la nostra fiducia nella validità della teoria di Einstein. Si attende ancora, tuttavia, una diagnosi astronomica diretta del comportamento esatto della gravità quando i suoi effetti sono davvero molto forti.

Pianeti intorno a una pulsar

La grande precisione con cui possono essere cronometrati gli impulsi regolari, che permise a Taylor di controllare la teoria di Einstein, ha anche permesso a un altro radioastronomo, Alex Wolszczan, di scoprire pianeti orbitanti intorno a una pulsar.

Come abbiamo detto nel capitolo 1, pianeti di *tipo solare* hanno completamente eluso le ricerche degli astronomi fino al 1995. Ma un sistema planetario intorno a una pulsar era già stato scoperto tre anni prima. Wolszczan ha utilizzato la radioantenna gigante dell'Osservatorio di Arecibo a Portorico per tenere sotto osservazione una certa pulsar per diversi anni. In questo modo trovò che c'erano delle irregolarità nei tempi d'arrivo degli impulsi, il che significava che la posizione della pulsar stava lievemente oscillando. La scoperta notevole

che fece, però, fu di rendersi conto che queste irregolarità derivavano dagli effetti combinati di due (e forse tre) pianeti che le orbitavano intorno. Questi pianeti, più piccoli della Terra, sono esposti – invece che alla comune luce stellare – all'intensa emissione di onde radio e a flussi di particelle veloci provenienti dalla pulsar, cosa che rende la loro superficie un posto ben poco propizio per la vita. Questo sistema planetario fuori dal comune offre nondimeno nuovi indizi su come si formino in generale i pianeti. Wolszczan ha avuto successo perché le tecniche che i radioastronomi usano per rilevare lievi cambiamenti del moto di una pulsar – arrivano a cronometrare gli impulsi con approssimazioni dell'ordine del microsecondo – sono molto più sensibili di qualunque altra che gli astronomi ottici possano a tutt'oggi dispiegare per osservare le stelle normali.[5] Infatti, questi ultimi hanno sinora scoperto solo pianeti grandi come Giove, centinaia di volte più pesanti della nostra Terra.

L'impulso tecnico

La natura della gravità è uno dei problemi fondamentali della scienza – le intuizioni più profonde al riguardo sono scaturite da un uomo, Einstein, che si staglia nell'immaginario del pubblico come l'archetipo del teorico. Ma anche in questo campo di indagine gli osservatori e gli sperimentatori hanno dato molto – i progressi ottenuti dipendono dalla loro originalità tecnica e dalla loro costanza. I risultati di Martin Ryle in radioastronomia, per esempio, sono frutto della sua inventività nel campo dell'elettrotecnica. E il contributo delle altre figure chiave presentate in questo capitolo – Herbert Friedman, con la sua competenza in missilistica; Riccardo Giacconi, che sviluppò i rilevatori di raggi X; e Joseph Taylor, che è arrivato a cronometrare l'emissione delle pulsar con una precisione di 15 cifre decimali – è dovuto alla loro genialità tecnica. Potrà anche sembrare che i teorici si concentrino più direttamente dei loro collaboratori sperimentali sullo scopo

dell'impresa scientifica – interpretare e capire ciò che è stato scoperto. Ma le intuizioni che portano all'innovazione tecnica sono spesso anche quelle che guidano veramente il progresso della ricerca. (Il salto intellettuale che ci vuole a inventare una chiusura-lampo sorpassa di gran lunga i risultati che molti fisici teorici potranno mai ottenere!)

Come abbiamo visto, fu per un colpo di fortuna che il merito della scoperta delle stelle di neutroni sia spettato, serendipicamente, ai radioastronomi invece che agli astronomi dei raggi X che se le aspettavano e le cercavano attivamente negli anni Sessanta e che, in effetti, le riscoprirono per via del tutto diversa tre anni dopo. Ma è l'astronomia a raggi X che, senza dubbio, ha assunto la guida del lavoro di conferma della più notevole fra le predizioni della teoria einsteiniana: l'esistenza dei buchi neri.

NOTE

1. L'interesse di Hewish si appuntava soprattutto su quelle peculiari galassie, molto lontane, che emettevano con tanta potenza nella banda delle radiofrequenze. Erano questi gli oggetti le cui proprietà statistiche avevano permesso a Martin Ryle di sferrare il primo colpo contro la teoria dello stato stazionario (vedi capitolo 2). I primi radiotelescopi, sfortunatamente, fornivano un quadro confuso; non rivelavano, per esempio, se le radioemissioni provenivano dal profondo di una galassia o da una zona più indeterminata che la circondasse. Hewish escogitò una tecnica speciale per diagnosticare la dimensione della sorgente. Il suo metodo sfruttava lo stesso meccanismo che fa scintillare le stelle, ma non i pianeti. La luce dei corpi celesti viene rifratta irregolarmente dagli strati superiori dell'atmosfera, ma le irregolarità sono piccole rispetto all'immagine apparente di un pianeta. Questa immagine ha forma di un disco piuttosto esteso, ed è tanto maggiore della dimensione media delle irregolarità che l'effetto di queste ultime risulta, in media, quasi del tutto trascurabile. Hewish scoprì che il flusso di gas che il Sole diffonde negli spazi interplanetari, il "vento solare", influenza le onde *radio* proprio come gli strati superiori dell'atmosfera influenzano la luce visibile. Se le radiosorgenti si fossero trovate a distanze di miliardi di anni luce, come Ryle riteneva, allora, se fossero state più piccole di una galassia, avrebbero scintillato; mentre non l'avrebbero fatto, se fossero state più grandi e con contorni più indeterminati.

2. Jocelyn Bell ha avuto meno credito di quanto non meritasse per la scoperta delle pulsar. Credo che ciò sia successo a causa delle pressioni sociali (all'epoca più forti di ora) che ostacolavano la carriera di una donna e ne limitavano le aspirazioni. Dopo aver conseguito il dottorato, Bell lasciò la ricerca attiva per vari anni: dare la priorità alla carriera di suo marito sembrava all'epoca la cosa "naturale" da fare. Se avesse invece continuato e acquisito visibilità restando nel gruppetto di radioastronomi che negli anni immediatamente successivi consolidò la nostra conoscenza delle pulsar e ne scoprì molte altre (come quasi sicuramente avrebbe fatto un *uomo* che avesse raggiunto i suoi eccezionali risultati iniziali), è difficile credere che i suoi risultati sarebbero stati tenuti in altrettanto poco conto.

3. Alcune pulsar, però, passano parte del loro ciclo vitale orbitando intorno a una stella compagna. Queste pulsar hanno storie più complicate, e a volte sono accelerate fino a raggiungere velocità di rotazione ancora più alte, fino a 600 rivoluzioni al secondo. Queste pulsar superveloci hanno campi magnetici più deboli delle altre, per motivi che non sono ancora chiari. Tuttavia, hanno meno "scatti" nella loro velocità di rotazione e di conseguenza rappresentano orologi migliori delle altre. Nel capitolo 12 discuteremo un'inferenza che si può trarre dalla regolarità del ritmo di questi orologi naturali.

4. L'energia che occorrerebbe fornire per poter disintegrare la stella (la cosiddetta "energia di legame gravitazionale") è tipicamente il 20 per cento della massa a riposo (mc^2). In effetti, è la gravitazione che fornisce alle pulsar la loro energia magnetica e rotazionale. Le stelle ordinarie ruotano lentamente (il periodo di rotazione del Sole, per esempio, dura circa un mese). Quando una stella (o il suo nucleo) collassa fino alle dimensioni di una stella di neutroni, essa ruota molto più velocemente e con molta maggiore energia. L'energia di rotazione fornisce a una stella "morta" più energia di quanta ne abbiano potuta generare le reazioni nucleari nel corso della sua vita precedente. Immagazzinata in una specie di enorme volano, questa energia – che in ultima analisi deriva dalla gravità – è quella che fa brillare le pulsar.

5. Pochi mesi prima dell'annuncio di Wolszczan, Andrew Lyne, radioastronomo di Jodrell Bank in Inghilterra, aveva sostenuto (sulla base di argomentazioni simili) di aver scoperto un pianeta intorno a un'altra pulsar. Si trovò poi che si sbagliava: le irregolarità nell'arrivo degli impulsi, che Lyne aveva attribuito alla presenza di un pianeta, derivavano invece da un sottile errore compiuto nel correggere le osservazioni in modo da tener conto del moto della Terra intorno al Sole. Ma se Wolszczan non avesse saputo della pretesa scoperta di Lyne, potrebbe forse non aver scrutato il cielo e i suoi dati con tanta attenzione, ottenendo un risultato così notevole. È un esempio, forse, di come persino il lavoro sbagliato possa a volte funzionare come stimolo costruttivo.

5

I BUCHI NERI: LE PORTE DELLA NUOVA FISICA

> Fui preso da un'acutissima curiosità: sentivo un forte desiderio di esplorare le profondità di quel gorgo, anche a costo di sacrificarmi, come sarebbe successo. Il mio maggiore rimpianto era che non avrei mai potuto raccontare ai miei vecchi compagni rimasti a terra i misteri che avrei visto.
>
> EDGAR ALLAN POE, *Una discesa nel Maelstrom*

Premonizioni

La gravità nelle stelle di neutroni è molto forte, ma ci sono altri corpi in cui è ancora più schiacciante. Sono i *buchi neri*: corpi che sono collassati fino al punto che nessuna luce, nessun segnale, niente, può sfuggire loro. Sono previsti da molte teorie della gravità, non solo da quella di Einstein. Congetture che in sostanza prevedevano la loro esistenza risalgono addirittura a oltre duecento anni fa. Nel 1783 John Michell presentò una memoria alla Royal Society sul modo in cui la gravità può influenzare la luce. Poligrafo e uomo di chiesa valutato al di sotto dei suoi meriti, egli aveva già effettuato studi di fisica sperimentale e sulle stelle binarie (vedi capitolo 2).

Michell osservava che un proiettile sparato dalla superficie del Sole avrebbe dovuto avere una velocità pari a circa un cinquecentesimo di quella della luce per riuscire a sfuggire alla gravità solare. Si rese conto che tale *velocità di fuga* (come viene oggi chiamata) sarebbe stata molto più grande per un cor-

po più pesante del Sole (di fatto, un semplice calcolo basato sulla fisica newtoniana mostra che la velocità di fuga da un corpo è, a parità di densità, proporzionale al raggio del corpo stesso). E scriveva:

> Se il semidiametro di una sfera della stessa densità del Sole superasse quello del Sole nel rapporto di 500 a 1, e supponendo che la luce sia attratta dalla stessa forza in proporzione della sua *vis inertiae* con altri corpi, tutta la luce emessa da un tale corpo sarebbe costretta a ritornare su di esso, a causa della sua stessa gravità.

Michell stava così suggerendo che i corpi più massicci non potessero essere rilevati dalla radiazione che emettono, ma che potrebbero pur sempre manifestare effetti gravitazionali sulla materia vicino a loro.

Pierre-Simon de Laplace avanzò la stessa idea nel suo *Système du Monde* del 1794. In realtà, cancellò il passo nelle edizioni successive del libro. Non è ben chiaro perché lo facesse; forse, nel frattempo, aveva perso fiducia in un argomento che pensava la luce come un fascio di particelle "balistiche".

La teoria di Newton è inadeguata quando i moti indotti dalla gravità si avvicinano alla velocità della luce. Ma la relatività generale è in grado di affrontare in modo del tutto coerente situazioni in cui la gravità diventa schiacciante, come nei buchi neri. Anzi: è proprio in queste situazioni che le equazioni di Einstein hanno le più notevoli fra le loro conseguenze.

I buchi neri secondo Einstein

Meno di un anno dopo la pubblicazione della teoria di Einstein, l'astronomo tedesco Karl Schwarzschild l'applicava al calcolo di come la gravità si sarebbe comportata nei pressi di una massa sferica. Einstein aveva già calcolato come si sarebbe incurvata la luce in prossimità del Sole; ma questo ri-

chiedeva solo un calcolo approssimato, perché la gravità nel sistema solare è abbastanza debole da rendere piccola la deflessione. Sapeva che le sue equazioni erano difficili da risolvere, e accolse con entusiasmo la scoperta di una soluzione. Schwarzschild, che era tenente dell'esercito tedesco, morì poco dopo a causa di una malattia contratta in servizio.

Schwarzschild aveva effettuato i suoi calcoli cinquant'anni prima della scoperta delle stelle di neutroni, i primi oggetti effettivamente osservati in cui la gravità sia abbastanza forte da manifestare in modo spettacolare le caratteristiche distintive della teoria einsteiniana. Lo scorrere del tempo viene distorto: un orologio posto sulla superficie della stella sembrerebbe, a un osservatore lontano, ticchettare più lentamente. Associato a questo effetto è quello dello "spostamento gravitazionale verso il rosso": la radiazione emessa dalla superficie raggiunge gli osservatori lontani con una frequenza più bassa (e una maggiore lunghezza d'onda). Questi effetti possono arrivare fino al 30 per cento sulla superficie di una stella di neutroni.

Che accadrebbe, allora, se una stella di neutroni dovesse contrarsi ulteriormente, o se una massa maggiore venisse costipata all'interno dello stesso volume? La gravità diventerebbe così forte che niente, nemmeno la luce, potrebbe più sfuggire alla sua attrazione. Il raggio minimo per cui la luce può ancora sfuggire risulta essere – ma si tratta solo di poco più che una coincidenza – esattamente uguale a quello calcolato a suo tempo da Michell. Quando si arriva al "raggio di Schwarzschild" lo spostamento gravitazionale verso il rosso è infinito. Si crea, infatti, "un orizzonte" che avvolge l'interno rendendolo inaccessibile alla vista, un sudario semipermeabile che può essere attraversato solo in un senso, verso l'interno.

I raggi di luce in prossimità di un buco nero si incurvano in modo ancor più accentuato che vicino a una stella di neutroni. Uno sperimentatore che si trovasse proprio al limite dell'orizzonte, per emettere un segnale dovrebbe puntare un fascio di luce lungo una direzione quasi esattamente radiale, altrimenti verrebbe distorto e inghiottito dal buco nero. Nessuno che si avventurasse oltre l'orizzonte potrebbe mai inviare *al-*

cun segnale luminoso al mondo esterno: è come se lo spazio stesso venisse risucchiato verso l'interno più velocemente di quanto la luce riesca a muoversi in esso. Un astronauta in caduta libera potrebbe attraversare l'orizzonte senza sperimentare alcunché di particolare al momento del passaggio. Ma non ci sarebbe poi alcuna possibilità di sfuggire. Un osservatore esterno non potrebbe testimoniare su quale sarebbe il destino finale del disgraziato astronauta: qualsiasi orologio apparirebbe rallentare sempre di più via via che cade verso l'interno, cosicché l'astronauta apparirebbe come impalato sull'orizzonte, "congelato" nel tempo.

Zel'dovič e Novikov, due fisici teorici russi che studiarono la distorsione del tempo nelle vicinanze di oggetti collassati, coniarono il termine "stella congelata". L'espressione "buco nero" risale al 1968, quando John Wheeler descrisse come un oggetto che cadesse verso l'interno "si farebbe sempre più confuso, millisecondo dopo millisecondo [...]. La luce e le particelle incidenti dall'esterno [...] scenderebbero nel buco nero solo per andare a sommarsi alla sua massa e far aumentare la sua attrazione gravitazionale".

La maggior parte delle cose del nostro universo ruota, e di conseguenza la maggior parte delle cose non è sferica. La soluzione di Schwarzschild è dunque troppo speciale per applicarsi agli oggetti reali. Nel 1963 il neozelandese Roy Kerr scoprì una soluzione più generale delle equazioni di Einstein, che rappresentava un oggetto *rotante* collassato. Come nel caso di Schwarzschild, un orizzonte avvolge l'esotico interno nascondendolo alla vista. Ma lo spazio si comporta come un vortice, gli oggetti sono costretti a roteare intorno al buco nero e, se gli si avvicinano troppo, a cadervi dentro inesorabilmente.

L'interno del buco non può essere osservato da una distanza di sicurezza. Occorre avere una spinta faustiana piuttosto forte per avventurarsi là dentro! Che accadrebbe? Un astronauta che vi cadesse sperimenterebbe forze di marea sempre più forti (la differenza fra l'accelerazione gravitazionale che agisce sulla sua testa e quella che agisce sui suoi piedi); queste forze divergerebbero all'infinito nell'arco di un tempo finito

misurato sull'orologio che cade. In un buco nero alla Schwarzschild l'aumentare delle forze di marea schiaccerebbe e stiracchierebbe alternatamente il povero astronauta con frequenze e intensità sempre maggiori. In un buco nero rotante le tensioni diventerebbero infinite lungo un anello invece che in un punto. Kerr si rese immediatamente conto che ciò forniva proprietà ancora più notevoli. Tutto eccitato, disse a un suo collega: "Passi attraverso quell'anello magico *et voilà*, sei in un universo completamente diverso in cui il raggio e la massa diventano negativi!".

Fuori dal buco

Negli anni Sessanta non era affatto chiaro se le soluzioni di Schwarzschild e di Kerr descrivessero un buco nero tipico o se si trattasse invece di buchi idealizzati e atipici in cui i teorici si erano imbattuti solo perché erano quelli deducibili sulla base di ipotesi semplificatrici che rendono più facilmente risolubili le equazioni di Einstein. Sappiamo oggi che non esistono altri tipi di buchi neri. Si tratta di una scoperta cruciale per la nostra comprensione dell'universo reale. Visti dall'esterno i buchi neri sono oggetti esattamente standardizzati: non persiste alcuna traccia che permetta di distinguere come si sono formati o che tipo di oggetti hanno inghiottito. Gli sforzi combinati di vari teorici dimostrarono questo risultato già all'inizio degli anni Settanta. La soluzione di Kerr, quando fu scoperta, sembrava descrivere una situazione speciale e asimmetrica. Ma acquistò un'importanza capitale quando i fisici teorici si resero conto che essa descriveva lo spazio-tempo nei pressi di un *qualunque* buco nero. Un oggetto che collassa si assesta in uno stato stazionario standardizzato caratterizzato da due soli numeri: il primo misura la sua massa, il secondo la sua rotazione. (In linea di principio la carica elettrica rappresenterebbe un terzo parametro per descriverlo, ma le stelle non hanno mai una carica elettrica abbastanza grande da essere rilevante nei fenomeni di collasso reali.)

I buchi neri sono "fantasmi" di stelle molto grandi ormai morte: sono collassate, tagliandosi fuori dal resto dell'universo, ma lasciando dietro di sé un'impronta gravitazionale, congelata nello spazio che hanno abbandonato. Nei pressi dei buchi neri il tempo e lo spazio si comportano in modo assai poco intuitivo. Per esempio, il tempo "si arresta" sulla superficie dell'orizzonte e un osservatore che se ne stesse lì sospeso vedrebbe scorrere davanti a lui l'intero futuro dell'universo esterno in un arco di tempo che, soggettivamente, gli sembrerebbe assai breve.

Per i fisici il collasso gravitazionale è molto importante perché, come vedremo in seguito, occorrono concetti interamente nuovi (proprio come per gli istanti iniziali del Big Bang) per capire che cosa stia accadendo. I paradossi su ciò che avviene all'interno di un buco nero sono altrettanto fondamentali e le loro implicazioni hanno una portata altrettanto vasta dei rompicapo che assillavano i contemporanei di Einstein all'inizio del XX secolo e che innescarono lo sviluppo della teoria della relatività e della teoria dei quanti. I buchi neri non permettono allo spazio e al tempo di essere un *continuum* senza strappi, senza cuciture. Potrebbero addirittura essere le porte che conducono ad altri spazi e altri tempi germogliati dal nostro spazio-tempo; l'esistenza dei buchi neri non solo permette, ma può addirittura richiedere un allargamento della prospettiva cosmica che porti a concepire il nostro universo – tutto quello, cioè, che oggi gli astronomi possono effettivamente "vedere" – solo come membro di una comunità.

I buchi neri come stelle morte?

Ma i buchi neri esistono sul serio? È da più di sessant'anni che abbiamo buone ragioni per rispondere di sì. Nel 1930 un giovane indiano molto precoce, Subrahmanyan Chandrasekhar, si era iscritto all'università di Cambridge, dove sperava di poter studiare con Arthur Eddington. Nel corso del suo lungo viaggio verso l'Inghilterra meditava sulle nane bianche

– su quei densi residui delle stelle che non possono più attingere all'energia nucleare. Raggiunse una conclusione stupefacente. Non possono esistere nane bianche più pesanti di 1,4 masse solari: la loro pressione centrale non potrebbe mai essere abbastanza forte da controbilanciare la gravità.

Il che sollevava il problema di che cosa succeda quando le stelle più massicce esauriscono il loro combustibile. Esse potrebbero, naturalmente, espellere così tanto materiale nel corso della loro evoluzione che la loro massa alla fine risulti inferiore al limite di Chandrasekhar per una nana bianca. Gli strati esterni potrebbero venir espulsi nel corso dell'esplosione di una supernova, dando così luogo a una stella di neutroni, come sembra sia avvenuto nella Nebulosa del Granchio. Ma c'è un limite anche a quanto possa essere pesante una stella di neutroni. È meno definito del limite per una nana bianca, perché dipende da come la materia si comporta quando viene strizzata fino a una densità molte volte superiore a quella di un nucleo atomico, ma quasi certamente questo limite si colloca al di sotto di tre masse solari.

Non tutte le stelle sono così previdenti da disperdere abbastanza gas per tenersi con sicurezza al di sotto di questo limite e ogni residuo stellare che superi le due o tre masse solari collasserebbe completamente quando la sua energia nucleare si esaurisse. Si ritiene che le supernove la cui esplosione si è innescata in una stella pesantissima, oltre le venti masse solari, lascino dietro di sé buchi neri e non stelle di neutroni; alcune stelle molto massicce potrebbero collassare in un buco nero anche senza produrre nessuna cospicua esplosione del tipo delle supernove. La Galassia, dunque, contiene sicuramente un gran numero di corpi collassati sotto l'azione della gravità. Ma come si può fare per trovarli?

I raggi X e la scoperta dei buchi neri

Una volta che si siano formati, i buchi neri sono essenzialmente "passivi" e le speranze migliori di riuscire a localizzarli

stanno nel riuscire a discernere i loro effetti gravitazionali sulle stelle o sulle nubi di gas circostanti. Yakov Zel'dovič fu uno dei primi a pensarla in questo modo. Zel'dovič ha un posto di primo piano nella moderna cosmologia, non solo per i suoi contributi individuali ma perché, dagli anni Sessanta in poi, la sua scuola di Mosca è stata alla testa di così tante scoperte – nonostante la cosmologia e la relatività fossero un tempo viste ideologicamente di malocchio in Unione Sovietica.

Zel'dovič è stato uno degli ultimi fisici veramente poliedrici: nelle prime fasi della sua carriera lavorò soprattutto in fisica delle particelle, dinamica dei gas e altri campi, nonostante il suo impegno di molti anni nel progetto per la costruzione della bomba H sovietica. Aveva studiato da tecnico, saltando l'istruzione superiore tradizionale e originariamente si era specializzato in chimica. Attribuiva la sua iniziale mancanza di interesse per la fisica ai metodi scolastici ultra tradizionali: il suo professore riferiva le leggi di Newton in latino, e solo dopo si compiaceva di tradurle in russo.

Zel'dovič si rese conto che un buco nero che orbiti molto vicino a una stella crescerebbe, attirando il gas della sua compagna. Il gas catturato mulinerebbe cadendo verso il buco nero, orbitando sempre più velocemente via via che si avvicina. La compressione e l'attrito viscoso lo renderebbero così caldo da fargli irradiare raggi X molto intensi. Se il flusso fosse poi turbolento e non costante, l'intensità dei raggi X oscillerebbe in modo irregolare.

L'osservazione dei raggi X mette in luce le strutture più ricche di energia del nostro universo: i gas più caldi, la gravità più forte, le esplosioni più violente. Come abbiamo già visto, le *stelle di neutroni* rotanti in un sistema binario che attirano materiali dalle loro compagne furono fra le prime sorgenti di raggi X a essere scoperte. Anche Cygnus X-1 è una sorgente di raggi X che orbita intorno a una compagna. Ma è diversa dalle altre, le stelle di neutroni, dato che i suoi raggi X variano in modo molto irregolare, senza un periodo ben definito. Per di più, pesa almeno sei masse solari, il che implica che non può trattarsi di una stella di neutroni o di una nana bianca.

Nella nostra Galassia ci sono oggi vari altri candidati a essere un buco nero, tutti almeno altrettanto convincenti di Cygnus X-1. Si trovano tutti in un sistema binario: stelle ordinarie ruotano intorno a loro, e da esse viene risucchiato il gas che finisce nel buco nero. Questi oggetti sono tutti troppo pesanti[1] per essere stelle di neutroni; il modo rapido e irregolare con cui varia la loro emissione di raggi X si adatta bene all'ipotesi che siano effettivamente buchi neri.

Gli argomenti a favore non è che siano proprio a prova di bomba; si possono immaginare interpretazioni *ad hoc* che non comportano l'esistenza di un buco nero. Su quale ipotesi conviene piazzare le scommesse? Se si ritiene che i buchi neri siano una cosa intrinsecamente assurda, o se invece si pensa che siano plausibili "capolinea" dell'evoluzione di una stella, il punto di vista ovviamente cambia. Ma le spiegazioni alternative sono in genere troppo forzate per essere convincenti: come dice il fisico Edwin Salpeter, "Un buco nero in Cyg X-1 è l'ipotesi più *prudente*".

I buchi neri più grandi

I buchi neri di cui ho parlato fin qui rappresentano lo stato finale dell'evoluzione delle stelle e hanno raggi compresi fra i 10 e i 50 chilometri. Ma, fuori dalla nostra Galassia, esistono buchi neri immensamente più grandi. Le prove della loro esistenza, anche se più recenti, sono oggi persino più cogenti di quelle per i buchi neri presenti nella nostra Galassia.

Nei centri di alcune galassie i gas e le stelle turbinano intorno a un buco nero che pesa milioni, o addirittura miliardi di volte il nostro Sole. Si manifestano sotto forma di quasar o come radiosorgenti cosmiche molto intense. Questi buchi, ciascuno dei quali ha le dimensioni del sistema solare, sono regioni che hanno già sperimentato il destino che attenderebbe ogni cosa se il nostro universo dovesse finire col ricontrarsi.[2]

Quando il suo rifornimento esterno di combustibile si

esaurisce, un quasar si spegne. Le ipotesi più attendibili sulla demografia dei quasar (sul loro numero, la durata della loro vita, su quante generazioni ne siano vissute e morte) suggeriscono che la maggior parte delle galassie abbiano attraversato una "fase quasar" e che possano dunque ospitare un buco nero, cimelio del tempo che fu, in agguato nel loro centro.

Persino un buco nero a riposo, un quasar ormai morto, esercita ancora un'attrazione gravitazionale su ciò che lo circonda, e dovrebbe dunque dare significativi segni della sua presenza nel centro di una galassia. Il primo di questi segni è un semplice "blip" nella luce proveniente da quella galassia, dovuto al fatto che le stelle vengono attratte verso il buco. Un altro sarebbe costituito da una prova che le stelle o le nubi di gas vicine al centro si stiano muovendo con una velocità anomala, troppo elevata.

Le galassie vicine a noi offrono, ovviamente, le migliori possibilità di scoprire effetti del genere. Una galassia gigante dell'Ammasso della Vergine, nota come M 87, ospita nel suo centro una massa oscura pari a tre miliardi di soli. Questo mostruoso buco nero sarebbe addirittura più grande dell'intero sistema solare, Nettuno e Plutone compresi. Un altro caso convincente riguarda la più grande fra i nostri vicini, la Galassia di Andromeda. Il suo buco nero centrale pesa circa 30 milioni di volte la massa del Sole. Questa prova è stata rafforzata dallo Space Telescope, che fornisce immagini di definizione maggiore di quelle dei telescopi al suolo. I buchi neri la cui massa supera il miliardo di masse solari sono così grandi che possono mangiarsi una stella in un sol boccone; una stella che cadesse verso un buco un po' più piccolo verrebbe prima fatta a pezzi, creando uno spettacolo pirotecnico più interessante e più visibile.

Il lavoro dei radioastronomi ha fornito prove ancor più cogenti dell'esistenza di buchi neri superpesanti, grazie all'utilizzazione di una tecnica speciale (il collegamento di radiotelescopi su distanze che abbracciano un continente intero) per produrre la mappa del centro di una galassia vicina, NCG 4258, con un dettaglio 100 volte maggiore di quello che persi-

no lo Space Telescope può fornire. Hanno così scoperto un disco di gas che orbita esattamente nel modo che ci si aspetterebbe se in quella galassia ci fosse un buco nero centrale con una massa pari a 36 milioni di soli.

Se ci sono per davvero dei buchi neri nella maggior parte delle galassie vicine, la nostra sarebbe ipodotata se non ne avesse uno anche lei. In effetti, il mio collega Donald Lynden-Bell e io già nel 1971 abbiamo presentato dei forti argomenti (almeno tali ci sembravano) a sostegno dell'esistenza di questo ipotetico buco.

Il piano della Via Lattea, in cui si trova il Sole, è pervaso di polveri che oscurano la vista. Di conseguenza, fino a poco tempo fa, era più difficile conoscere con precisione ciò che avviene nel centro della nostra Galassia che sapere cosa succede in quello di Andromeda. Ma Reinhard Genzel e i suoi colleghi del Max Planck Institut di Monaco hanno ottenuto immagini infrarosse di eccellente definizione delle stelle che si trovano nel "fulcro" della nostra Galassia. Queste stelle si muovono con una rapidità anomala e sembra che orbitino intorno a un oggetto oscuro con una massa due milioni e mezzo di volte più grande del Sole. Il che è circa dieci volte di meno della massa centrale che si trova in Andromeda e implica che la nostra Galassia non può aver mai ospitato un quasar molto potente.

Spesso le galassie si scontrano e si fondono insieme. Se si fondono due galassie ciascuna delle quali contiene un buco nero massiccio, allora i due buchi si muoveranno a spirale l'uno verso l'altro nel centro della nuova galassia e si salderanno insieme. La coalescenza di due buchi neri è un processo che coinvolge nientemeno che la dinamica stessa dello spaziotempo. Risolvere le equazioni di Einstein in questa situazione violentemente instabile e asimmetrica rappresenta una sfida che nemmeno gli attuali supercomputer riescono ad affrontare. Nel corso della coalescenza una specie di rinculo potrebbe impartire un colpo così forte al buco nero risultante dalla fusione da riuscire forse a espellerlo dalla galassia che lo ospita. Alcuni buchi neri enormi, creatisi nelle galassie, potrebbero

oggi andare schiantandosi uno contro l'altro, nelle immensità dello spazio intergalattico.

L'immagine matematica: i "singolari" misteri contenuti nel buco

Le equazioni di Einstein possono essere risolte facilmente solo in casi particolarmente semplici; per esempio, quello del collasso di un oggetto perfettamente sferico o quello dell'espansione di un "universo modello" completamente uniforme. Ma queste soluzioni sono guide affidabili per capire che cosa succede nei casi più realistici?

Occorreva che venissero messe in campo nuove teorie matematiche prima che i teorici potessero analizzare – in situazioni più realistiche e meno idealizzate – le stelle che collassano o universi che si espandono. È stato Roger Penrose il personaggio che ha avuto il ruolo di catalizzatore in questo campo. Penrose, che si era formato come matematico, ha introdotto nuove tecniche matematiche che hanno rivelato come le *singolarità*, i punti in cui la forza di gravità "tende all'infinito", siano profondamente radicate nella struttura dello spazio e del tempo. Quando la soluzione di un'equazione "esplode" in questo modo – quando comincia "a uscire fumo dal computer" – significa in genere che la teoria viene meno o che è diventata in qualche modo inadeguata.

Qualsiasi cosa imploda in modo esattamente simmetrico deve ovviamente schiacciarsi in un unico punto centrale: la forza gravitazionale diventa infinita anche nel contesto della teoria newtoniana. Questo infinito è però artificialmente prodotto dalla simmetria: se l'implosione non fosse esattamente radiale, i pezzi non si incontrerebbero tutti insieme in un punto. Ma nella teoria di Einstein anche un collasso *generico* dà luogo a una singolarità: i moti trasversali aggiungono energia cinetica, ciò che equivale ad aggiungere massa, rinforzando così la gravità, che attrae ogni cosa una verso l'altra.

Ogni volta che si forma un buco nero, nel suo interno si deve formare anche una singolarità. Nel 1965 Penrose tenne a

Cambridge una prima esposizione di questo punto. Ero allora appena laureato, troppo inetto matematicamente per capire a fondo tutto quello che lui diceva. Ma le implicazioni erano chiare. Penrose aveva mostrato che la teoria di Einstein prediceva la sua stessa incompletezza. Gli "infiniti" in una teoria sono un segno che sta intervenendo una forma di nuova fisica. Ciò che avviene è un mistero: lo stesso spazio può mutare la sua struttura su scale estremamente piccole; possono forse emergere nuove dimensioni; regioni lontane dello spazio potrebbero finire col venire incollate insieme o addirittura germogliare in nuovi universi. (Riprenderemo queste idee nel capitolo 14.) I teoremi di Penrose implicano pure che ci deve essere stata una singolarità agli inizi del nostro universo, persino se il Big Bang fosse stato altamente asimmetrico e irregolare.

Penrose pensa non solo con maggior chiarezza della maggior parte di noi, ma in un suo modo caratteristico e piuttosto inusuale. La sua capacità di visione geometrica è unica. I fisici matematici si dividono in due tipi. Alcuni di essi, dopo essersi imbattuti nelle equazioni giuste pensano alle equazioni più che al fenomeno fisico che esse rappresentano (Chandrasekhar, per esempio, pensava molto in termini di equazioni). Altri si trovano più a loro agio con rappresentazioni pittoriche o con concezioni geometriche; Penrose si colloca all'estremo "geometrico" di questo spettro, a suo agio nel visualizzare quattro e più dimensioni come la maggior parte di noi nel vederne due sole.

È notevolissima la vastità e l'originalità delle sue intuizioni. Ha passato molti anni a inventare e a sviluppare la teoria dei "*twistors*", che concepisce lo spazio e il tempo come costituiti non da punti, ma da "coni di luce" allacciati insieme. Persino quando si è dedicato alla matematica "dilettevole e curiosa" ha dato contributi fecondi. Le "piastrelle di Penrose" hanno una configurazione che non si ripete mai, per quanto grande sia la superficie che ricoprono: questo suo lavoro è stato ripreso dai cristallografi dopo la scoperta dei cosiddetti "quasi-cristalli". I quasi-cristalli sembrano possedere una simmetria pentagonale, anche se era ben noto che non può esistere nes-

sun reticolo pentagonale che si ripeta in modo regolare. Insieme a suo padre Lionel (un genetista), Roger ha inventato gli "oggetti impossibili" – disegni in prospettiva che non possono avere un'interpretazione coerente come oggetti solidi reali – divenuti poi comuni (per esempio) come base delle incisioni di Escher.

Molti di questi temi appaiono nel libro di Penrose *La mente nuova dell'imperatore*, un'eclettica cavalcata attraverso tutti i campi in cui ha riversato il suo entusiasmo. Nel volume sono affrontati due dei più difficili fra i problemi fondamentali: quello di riconciliare la gravità con la meccanica quantistica e quello della natura dell'intuizione, della coscienza e del pensiero umani. Penrose sostiene che questi due misteri siano legati; affermazione caratteristica quanto controversa. Ma anche coloro che non siano convinti di questa tesi potranno godere scegliendo fra i vari capitoli come da un menu *à la carte*. Il libro ha avuto un successo inusuale, da *best-seller*. La *manchette* pubblicitaria "Un grande scienziato dimostra che la mente umana è più di una semplice macchina", era certo fra le più seducenti. Ma negli aspetti tecnici il libro non scende a compromessi, cosa che ha riservato una brutta sorpesa per alcuni lettori un po' confusi.

Nei primi tempi della teoria della relatività Arthur Eddington ne fu a Cambridge il più valido campione e divulgatore. Quarant'anni dopo, quando la relatività conobbe il suo rinascimento, Dennis Sciama (le cui idee cosmologiche sono già entrate in scena, nel capitolo 2) ne fu a Cambridge l'esponente più influente. Fu Sciama che spinse Penrose, che in origine era un matematico puro, a lavorare sulla relatività. Nel corso degli anni Sessanta Sciama attirò e ispirò un flusso costante di studenti, catalizzando così molti degli sviluppi chiave della relatività e della cosmologia. Fra questi studenti c'era Stephen Hawking. Sciama lo incoraggiò a frequentare le lezioni di Penrose in cui si esponeva quella matematica che, in seguito, Penrose e Hawking utilizzarono per i loro studi congiunti sul collasso gravitazionale.

I risultati di questi lavori furono codificati in un libro mol-

to tecnico, *The Large-Scale Structure of Spacetime* (*La struttura su larga scala dello spazio-tempo*), che Hawking scrisse insieme a George Ellis, un altro ex-studente di Sciama. Fu grazie a questo volume e ai suoi lavori sulla natura dei buchi neri che Hawking divenne all'inizio degli anni Settanta uno dei *leader* riconosciuti nel campo della relatività. La sua salute era già molto fragile. Nessuno di noi avrebbe allora potuto prevedere le stupefacenti fasi che la sua carriera avrebbe poi conosciuto. La più notevole delle sue scoperte, l'evaporazione dei buchi neri (qui descritta nel capitolo 11), risale al 1974. Ma ciò fu solo il primo slancio che lo spinse a un crescendo di risultati che continua ancora oggi. Nessun altro, dai tempi di Einstein (salvo forse Penrose), ha dato maggiori contributi alla nostra comprensione della gravità. E nessun fisico dai tempi di Einstein in poi ha mai raggiunto una simile fama.

Quando Hawking ricevette una laurea *honoris causa* dall'università di Cambridge, l'Oratore citò l'elogio di Epicuro nel poema di Lucrezio:

> Ergo vivida vis animi pervicit, et extra
> processit longe flammantia moenia mundi
> atque omne immensum peragravit mente animoque,
> unde refert nobis victor quid possit oriri,
> quid nequeat, finita potestas denique cuique
> quoniam sit ratione atque alte terminus haerens.*

L'ammirazione per i suoi risultati è stata fortemente amplificata dallo stridente contrasto fra le sue condizioni fisiche e la sua mente "vagante nel cosmo". Il suo fascino sarebbe forse diverso se avesse raggiunto livelli simili, per esempio, in biologia cellulare o in chimica.

* "Così la vivida tensione dell'animo vinse e avanzò lontano, oltre le fiammeggianti mura del mondo e l'universo immenso percorse con la mente e col cuore; e di là riporta a noi, vittorioso, quel che può nascere e quel che non può e secondo qual legge ogni cosa ha un potere definito e con termine profondamente infisso." Tito Lucrezio Caro, *La Natura*, a cura di A. Fellin, UTET, Torino 1976. [NdT]

La fama di Hawking presso il grande pubblico è derivata, ovviamente, da un libro scritto con uno stile molto diverso da quello che fece con George Ellis: *A Brief History of Time* (*Breve storia del tempo*).* La cosa più meravigliosa di questo libro è proprio il fatto che sia stato scritto. Hawking ne aveva finito un primo abbozzo, quando fu colpito da una recrudescenza della sua malattia che lo lasciò, per un certo periodo, completamente immobile e incapace di comunicare, se non indicando con gli occhi le lettere dell'alfabeto poste su un gran tabellone nella sua camera. Senza la tecnologia dei calcolatori non gli sarebbe mai stato possibile trasformare in parole pensieri che non riguardassero richieste del tutto elementari. Ma un *word processor* controllato da un sistema di leve gli permise, anche se lentamente e faticosamente, di completare il libro. Un sintetizzatore vocale gli consentì di conversare più chiaramente di prima e persino (se accuratamente preprogrammato) di presentare conferenze pubbliche immensamente popolari. I progressi delle tecniche di traduzione automatica gli permetteranno, senza nessuno sforzo extra, di rivolgersi, poniamo, al pubblico giapponese o coreano nella sua stessa lingua.

Gli scienziati generalmente limitano la loro attività di scrittori alla stesura di articoli molto tecnici che appaiono in riviste accademiche dopo essere stati letti e approvati da un *referee* (in genere anonimo), un collega che teoricamente dovrebbe stabilire se sono o non sono degni di essere pubblicati. È con questo sistema formale che si viene costruendo il consenso scientifico. Ma queste riviste – la cosiddetta "letteratura" – sono impenetrabili per chi non è uno specialista del ramo. Al giorno d'oggi esistono soprattutto per motivi archivistici, e neanche i ricercatori le leggono un granché, dato che l'informazione circola più attraverso preprint informali, posta elettronica e convegni vari. Un collega mi ha detto una volta che il numero medio di lettori di un articolo scientifico è 0,6 (e si

* Il titolo della traduzione italiana (Rizzoli, Milano 1988) è però *Dal Big Bang ai buchi neri.* [NdT]

domandava cinicamente se nella media è stato o no contato il *referee*). L'essenza del *contenuto* di questi articoli – almeno di quelli che sopravvivono all'esame critico e intellettuale – finisce, naturalmente, col diffondersi presso un pubblico più vasto. La maggior parte di noi troverebbe minor soddisfazione nel suo lavoro se la nostra ricerca non riuscisse mai a filtrare fra i non specialisti. L'impatto e la portata della *Brief History of Time* di Stephen Hawking sono senza confronti. Disgraziatamente questo successo ha avuto una conseguenza negativa: il libro è finito nelle mani di filosofi e teologi, ed è stato discusso e analizzato più di quanto non potesse sopportare!

Ma Einstein aveva ragione?

La rinascita della ricerca in fisica della gravitazione cominciò negli anni Sessanta e fu in parte dovuta a tecniche matematiche più potenti; ma fu anche stimolata da scoperte dovute alle osservazioni. Per la prima volta gli astronomi si resero conto che esistono luoghi nell'universo – e persino all'interno della nostra Galassia – dove gli effetti relativistici potevano avere implicazioni straordinarie. L'esaltazione di quell'epoca è ben resa in un discorso tenuto da Thomas Gold a un banchetto, in occasione della prima conferenza sul nuovo campo della "astrofisica relativistica", che si tenne a Dallas nel 1963. Gold diceva che

> i relativisti con i loro raffinati studi non sono solo un magnifico ornamento culturale, ma possono essere veramente utili alla scienza! Tutti sono contenti: i relativisti che si sentono finalmente apprezzati, che si ritrovano all'improvviso a essere gli esperti di un campo di cui conoscevano a mala pena l'esistenza; e gli astrofisici che vedono allargarsi il loro dominio d'indagine [...]. È tutto molto bello, speriamo che sia vero!

La relatività generale ha la virtù di essere altamente specifica. Anche una qualunque osservazione o un qualunque espe-

rimento, uno solo, che discrepasse dalle sue predizioni avrebbe un effetto micidiale. È una teoria che non può essere rimessa in corsa con qualche piccolo riaggiustamento o un ritocchino qua e là. La motivazione per continuare a immaginare e progettare nuovi controlli è tutta qui. La scoperta dei buchi neri apre una via per sottoporre a controllo le più notevoli conseguenze della teoria einsteiniana.

Oggetti come Cygnus X-1 e i centri galattici sono posti in cui lo spazio del nostro universo viene come traforato dall'accumularsi e dal collassare di masse molto grandi – masse che collassano in entità descritte esattamente da formule veramente semplici (la soluzione di Kerr delle equazioni di Einstein). Come ha notato Roger Penrose, "C'è dell'ironia nel fatto che l'oggetto astrofisico più strano e meno comune, il buco nero, debba essere anche quello di cui abbiamo l'immagine teorica più completa".

I buchi di massa veramente grande offrono le prospettive migliori per confrontare le osservazioni con la teoria della gravitazione. Un buco nero di massa stellare si sviluppa solo dopo essere collassato fino a densità dell'ordine di un nucleo atomico, con tutte le indeterminazioni che implica la fisica delle alte densità. Per contro, i buchi neri dei centri galattici, alcuni dei quali hanno la massa di miliardi di soli, possono essersi formati senza essere più densi dell'aria.[3]

La radiazione che proviene da questi oggetti è causata dal gas caldo che mulinella precipitando in un profondo "pozzo" gravitazionale; presenta effetti Doppler molto grandi, e anche uno spostamento verso il rosso aggiuntivo a causa dell'intensità della gravità. Misurando questa radiazione, e specialmente i raggi X, si può sondare il flusso molto in prossimità del buco nero, e diagnosticare se la "forma dello spazio" in quelle zone concordi con ciò che predicevano Schwarzschild e Kerr.[4]

Ma misteri ancor più profondi ci aspettano *all'interno* del buco nero. Le condizioni sulla superficie dei buchi neri enormi come quello della galassia M 87 non sono così proibitive. Una stella potrebbe scivolare dentro l'orizzonte prima di essere distrutta; e – in linea di principio – lo potrebbe fare anche un astronauta. Se ne potrebbe restare fermo là per diverse ore, forse anche giorni, per poter osservare con tutta calma prima di essere malamente attirato dalla singolarità centrale. Che cosa accadrebbe allora? Se il buco nero non ruotasse e se ne fosse restato indisturbato per un lungo periodo, le forze di marea stiracchierebbero radialmente l'astronauta che vi sta cadendo dentro. Ma in un buco più realistico le forze di marea lo scuoterebbero con violenza crescente, lo "spaghettificherebbero", come si usa dire per descrivere il suo probabile destino. Inoltrandoci nelle speculazioni, si può pensare che potrebbe ritrovarsi a emergere in un nuovo spazio, forse addirittura in un nuovo universo inflazionario (vedi capitolo 14). Qui sta la rilevanza dei buchi neri – degli immensi gorghi nei centri delle galassie e dei loro più modesti corrispettivi che orbitano in sistemi binari nella nostra Galassia – per una più vasta prospettiva cosmologica.

Progressi coerenti e incoerenti

La relatività generale, o fisica gravitazionale, costituisce un caso interessante per gli studiosi di storia della scienza. I progressi concettuali chiave verificatisi dagli anni Sessanta in poi possono esser fatti risalire alla collaborazione e all'interazione di un piccolo numero di ricercatori d'avanguardia, quasi tutti usciti da tre scuole: una guidata da Zel'dovič a Mosca, l'altra da Sciama a Cambridge, la terza da Wheeler a Princeton. Inoltre, le interazioni fra di loro sono state quasi universalmente cooperative e costruttive. (In un libro recente, *Black Holes and Time Warp* (*I buchi neri e la piegatura del tempo*), il teorico americano Kip Thorne fornisce una sua panoramica su questa comunità di ricerca.) Da questo punto di vista, la fisica della gravitazione è atipica rispetto ai progressi messi in scena in questo libro: normalmente, la scienza progredisce in modo più tumultuoso e meno coerente.

Gli astronomi sono degli esploratori: la serendipità gioca

sempre un grosso ruolo in quello che fanno e scoprono. Sono pochi i fenomeni che erano stati previsti in modo veramente azzeccato, anche se i teorici spesso pensano (e a volte dicono), col senno del poi: "Accidenti, avrei potuto prevederlo!". La maggior parte delle scoperte ha colto di sorpesa i teorici, lì per lì lasciandoli perplessi. A volte il quadro si chiarisce rapidamente: emerge un'interpretazione plausibile e si forma rapidamente un consenso. A volte cerchiamo, senza frutto, di interpretare dati frammentari, quando un anno o due dopo ulteriori prove rivelano che tutte le idee precedenti, o (in casi fortunati) tutte meno una, erano false partenze. La radiazione di fondo a microonde, per esempio, fu rapidamente riconosciuta come una reliquia dell'universo primordiale (capitolo 3); e non ci volle molto prima che le pulsar (capitolo 4) venissero interpretate e accettate come stelle di neutroni rotanti.

Ma non tutti i fenomeni si incastrano così rapidamente al loro posto – in alcuni casi occorrono decenni perché il mistero si dissolva. Ripensando alla ricerca trentennale sui quasar (capitolo 2), da quando questi oggetti superluminosi furono scoperti a oggi, la lentezza dei progressi è deprimente. In certi momenti avevamo l'illusione che si stessero facendo rapidi passi in questo campo; ma ciò che avveniva realmente era un progresso lento, con un andamento da montagne russe, influenzato dalle mutevolezze della moda del momento.

In un certo senso, i quasar furono scoperti troppo presto. Se fossero stati scoperti dopo il pieno sviluppo della teoria dei buchi neri, e dopo la scoperta delle pulsar e delle massicce emissioni di raggi X che ci fecero familiarizzare con l'efficacia di potenti sorgenti gravitazionali, si sarebbe sviluppato più rapidamente un consenso su quale fosse il loro motore interno.

Molte delle bizzarre idee che circolavano correntemente nei primi tempi della ricerca sui quasar sono state oggi abbandonate. Ma in astrofisica di rado si riescono ad avere confutazioni definitive: le interpretazioni rivali persistono per lungo tempo. Un cinico potrebbe dire che spesso sopravvivono solo perché i loro sostenitori si dedicano ad aggiustare le parti difettose o a sostituirle, un po' come si fa con le automobili da

rottamare in modo che possano tenere la strada ancora per un po'. Si tratta di un atteggiamento che non è sempre giustificato e per spiegare perché, devo scendere in una breve digressione metodologica.

Ci hanno detto che il modo con cui si fa scienza funziona così: i dati suggeriscono un'ipotesi, che a sua volta suggerisce ulteriori esperimenti, in seguito ai quali l'ipotesi originaria viene o confutata o confermata. Questa semplice procedura è realistica, per esempio, nella fisica delle particelle, in cui le entità fondamentali possono essere riconducibili con esattezza a poche equazioni e costanti fondamentali. Ma altre scienze trattano oggetti di insita complessità e non esistono schemi teorici che possano dar conto di essi in ogni dettaglio. In geofisica, per esempio, i concetti di deriva dei continenti e di tettonica a placche (o a zolle, come altri dice) hanno senza dubbio portato a progressi fondamentali; ma non ci dovremmo aspettare che possano spiegarci perché l'America e l'Africa hanno le forme che hanno e non altre. I tentativi di capire i fenomeni cosmici dovrebbero focalizzarsi su quelle caratteristiche dei dati che consentono veramente di sottoporre a controllo le idee cruciali e non venire deviati nel tentativo di interpretare ciò che è accidentale o secondario.

Troppo spesso l'immagine che offriamo assomiglia a una specie di caricatura. Possiamo però sperare che, come ogni buona caricatura, questa colga – e non oscuri – l'essenza del fenomeno.

Epilogo

Dopo i suoi pionieristici studi sulla fine della vita delle stelle, Chandrasekhar (universalmente noto come "Chandra") si diede ad altri argomenti. Il suo stile di ricerca era inusuale. Si sceglieva un argomento e l'esplorava completamente per molti anni. Poi sistematizzava i suoi pensieri in un libro, e passava ad altro. Ha prodotto testi divenuti classici sulla struttura stellare, sulla dinamica dei sistemi stellari, sulla meccanica dei

fluidi e altri argomenti specialistici. Ma ritornò allo studio dei buchi neri solo molto più avanti nella sua vita.

I primi anni Settanta furono l'età eroica della ricerca sui buchi neri. I teorici avevano scoperto che, se Einstein aveva ragione, i buchi neri non avevano una diversità infinita, ma erano oggetti standardizzati, caratterizzati con precisione, tanto quanto lo è una particella elementare, dalla loro massa e dalla loro rotazione. E gli astronomi stavano cominciando a sospettare che i buchi neri non fossero solo costruzioni teoriche, ma potessero realmente esistere nel nostro universo.

Ciò impressionò molto Chandra, sia sul piano estetico che su quello scientifico. In una conferenza del 1975 diceva:

> In tutta la mia vita scientifica [...] l'esperienza che mi ha più scosso è stato il rendermi conto che una soluzione esatta delle equazioni di Einstein – quella scoperta dal matematico neozelandese Roy Kerr – fornisce una rappresentazione assolutamente calzante di un numero imprecisato di massicci buchi neri che popolano l'universo. Questo "brivido della bellezza", questo fatto incredibile che una scoperta motivata da una ricerca del bello in matematica debba trovare la sua esatta replica in natura, mi persuade a dire che è alla bellezza che risponde la mente dell'uomo nelle sue più riposte profondità.

Chandra era già sulla sessantina quando si imbarcò nella ricerca sui buchi neri. Si deliziava a citare la risposta del grande fisico Lord Raylegh a T.H. Huxley che sosteneva che "gli scienziati che hanno oltrepassato i sessant'anni fanno più danni che altro". Raylegh (che di anni ne aveva 67) gli rispose: "È possibile, se si mettono a criticare il lavoro dei giovani. Ma non vedo perché dovrebbe essere così, se continuano a fare le cose con cui hanno dimestichezza". Precetto questo che fu chiaramente seguito da Chandra. Non riuscì mai a impadronirsi pienamente delle tecniche matematiche introdotte da Roger Penrose e che avevano dato tanto slancio a questo campo. I suoi contributi li ottenne, invece, adattando i metodi più classici che aveva usato in altri contesti.

Analizzò come i buchi neri risponderebbero se il loro equilibrio venisse perturbato, estendendo tecniche che erano state tradizionalmente usate per lo studio delle vibrazioni di un tamburo, o della terra e degli oceani. Queste tecniche, in un certo senso, sono complementari a quelle di Penrose: non possono trattare un collasso generico, in cui non ci sia un qualche grado speciale di simmetria; ma producono un quadro più quantitativo di che cosa avvenga se un buco nero viene perturbato (per esempio, da un oggetto più piccolo che vi cada dentro o che gli orbiti molto vicino). Queste tecniche offrono una specie di "sonda" per i buchi neri, proprio come i sismologi possono studiare la struttura interna della Terra analizzando i vari modi di oscillazione della sua crosta quando si assesta dopo un terremoto.

L'energia intellettuale di Chandra fu qualcosa di unico: combinata con la sua autodisciplinata precisione gli permise di portare a termine le più elaborate manipolazioni matematiche senza smarrirsi e (cosa altrettanto notevole) senza errori. Mi ricordo la prima volta che ascoltai un suo seminario a Cambridge. Presentava le sue formule su lucidi, che faceva passare a velocità sconcertante perché ogni equazione era troppo lunga per stare su un lucido solo ed era spezzata su due o tre. Terminò la sua esposizione in quel modo distaccato che gli era peculiare: "Beh, potete anche pensare che abbia usato un martello per rompere le uova. Ma le ho rotte".

Il virtuosismo matematico di Chandra si manifesta in modo spaventoso nel suo trattato di 650 pagine *The Mathematical Theory of Black Holes* (*La teoria matematica dei buchi neri*). In un capitolo (lungo un centinaio di pagine) le manipolazioni matematiche sono così pesanti, ma la linea di argomentazione così chiara, che aggiunse questa nota:

> I passaggi necessari per passare da una tappa alla successiva sono [in questo capitolo] spesso molto elaborati, e impiegherebbero dieci, venti o anche cinquanta pagine. Nel caso che qualche lettore voglia sottoporre ad attento esame l'intero sviluppo dell'argomentazione, le elaborazioni dell'autore

(contenute in 600 fogli protocollo e in sei quaderni aggiuntivi) sono state depositate presso la Joseph Regenstein Library dell'University of Chicago.

Era tale l'aura che avvolgeva Chandra e l'argomento che trattava che questo impervio e formidabile libro vendette varie migliaia di copie in edizione economica. Vendite naturalmente non paragonabili con quelle della *Brief History of Time* di Hawking. Ma è probabile che abbia superato Hawking nel rapporto fra copie vendute e copie effettivamente lette. Il lettore perseverante si sentirà in sintonia con la reazione che a suo tempo ebbe William Whewell leggendo la matematica dei *Principia* di Newton: "Sentiamo di trovarci in un'antica armeria, con armi gigantesche [...] e ci chiediamo sgomenti che uomini fossero mai quelli che potevano usare armi che noi potremmo a mal fatica issarci come some sulle spalle."

Chandra aveva 72 anni quando uscì il suo volume sui buchi neri. La maggior parte di noi sospettava che questa sarebbe stata l'ultima delle sue monografie. Avrebbe chiuso la sua carriera con una simmetria perfetta: aveva codificato la nostra comprensione di quegli oggetti che aveva intravvisto quando era ancora studente a Cambridge, decenni prima, con un'intuizione iniziale che gli aveva dato altrettanta fama dei successivi cinquant'anni di fatiche intellettuali. Ma ci sbagliavamo. Chandra continuò infaticabilmente a produrre articoli altamente tecnici.

E al tempo stesso veniva preso da un nuovo entusiasmo. Per tutta la vita era stato affascinato dagli individui capaci di scalare le vette supreme della creatività, nella scienza o nelle arti. E così si addentrò in uno studio approfondito dell'opera di Newton, culminato in un'esposizione di 600 pagine, *Newton's "Principia" for the Common Reader*, pubblicato nel 1995.

Chandra voleva che il suo libro sui *Principia* fosse la sua ultima fatica. Aveva deciso, a 84 anni, di mettere un punto fermo alle sue straordinarie fatiche scientifiche. Aveva sempre criticato gli scienziati anziani che vivono ormai solo della loro

reputazione; un taglio netto gli sembrava migliore del rischio di scendere a compromessi con i suoi standard intellettuali. Diceva ai suoi colleghi: "C'è un tempo per tutto, e c'è un tempo per porre fine a tutto". Morì nell'agosto 1995; il suo ultimo articolo fu pubblicato in quello stesso mese. Si sarebbe davvero riposato dell'arduo regime cui si era sottoposto, o avrebbe davvero dato un taglio netto a una lunga vita di pensiero, studio, lavoro?

Alcuni scienziati, invecchiando, smettono di fare ricerca. Altri continuano a sentire la spinta e il bisogno di capire il mondo, ma non trovano più soddisfazione nei problemi di *routine*. Costoro si gettano in imprese oltre la loro portata, spesso con risultati imbarazzanti,[5] affrontando – e addirittura pretendendo di aver risolto – problemi fondamentali ben al di là della loro competenza reale. Ma Chandra no: non fu nemmeno tentato da nessuna di queste due strade.

NOTE

1. Gli astronomi possono misurare l'effetto Doppler nella luce proveniente dalla stella compagna e inferirne la sua velocità orbitale. Le leggi newtoniane della gravità ci dicono quanto debba essere massiccia la sorgente dei raggi X, allo stesso modo in cui possiamo stimare la massa del Sole sapendo a quale velocità si muove la Terra e le dimensioni della sua orbita. Le sorgenti che si ritiene siano stelle di neutroni hanno tutte una massa prossima a 1,4 masse solari; i candidati a essere un buco nero (quelli che emettono in modo irregolare) sono varie volte più pesanti.

2. I buchi neri di grande massa possono generare energia in due modi. Se attirano gas o anche stelle intere dai loro dintorni, il materiale catturato mulinella intorno a loro e può convertire, prima di essere irrevocabilmente inghiottito, circa il dieci per cento dell'energia della sua massa a riposo mc^2 in radiazione. Si tratta di una versione ingigantita di ciò che potrebbe star accadendo intorno a Cygnus X-1. Ma c'è anche un altro e più interessante processo, scoperto da due miei colleghi di Cambridge, Roger Blandford e Roman Znajek. I buchi neri si comportano come un giroscopio o un volano. Blandford e Znajek hanno mostrato che un campo magnetico esterno, che potrebbe essere generato dal gas o dalle stelle della galassia che li ospita, può "frenare" un buco rotante, estraendo così l'energia latente nella sua rotazione. Le intense radiosorgenti cosmiche di cui abbiamo parlato nel capitolo 2 sono probabilmente rifornite di energia da questo tipo di processo.

Gli astrofisici puntano a calcolare quanta potenza è prodotta dall'accrescimento per aggiunta di materia e quanta invece viene estratta dalla rotazione del buco, in modo da determinare la forma con cui si manifestano i loro rispettivi contributi. Tali calcoli hanno lo stesso ruolo nel costruire modelli dell'attività dei centri galattici di quello che svolge la fisica nucleare nelle teorie della struttura stellare e dell'evoluzione delle stelle. I fenomeni che avvengono nei centri delle galassie sono stati uno dei miei principali interessi di ricerca, ma sono periferici rispetto al tema del presente volume.

3. Il raggio di un buco nero è proporzionale alla sua massa M, di conseguenza il suo volume V è proporzionale al cubo della massa (M^3). La densità che un oggetto deve raggiungere prima di escludersi dal resto dell'universo e diventare un buco nero è dunque proporzionale a $\frac{M}{V} = \frac{M}{M^3} = \frac{1}{M^2}$, ovvero all'inverso del quadrato della sua massa.

C'è un limite a quanto una stella possa avvicinarsi a un buco nero senza subire danni. Una stella sarebbe sottoposta a effetti di marea, cioè al *gradiente* dell'attrazione gravitazionale intorno alla stella. Le forze di marea sono meno violente alla "superficie" dei buchi neri più grossi: quello della galassia M87 potrebbe inghiottirsi una stella grande come il nostro Sole senza distruggerla. Se la massa del buco, però, è inferiore a cento milioni di masse solari (l'ordine di grandezza che hanno i buchi neri nelle galassie più vicine a noi), una stella di tipo solare sarebbe disgregata dalle forze di marea se si avvicinasse al buco nero per meno di dieci volte il raggio del buco stesso. (Una stella molto compatta, una nana bianca, per esempio, potrebbe invece caderci dentro restando più o meno intatta.) Una stella risponde in modo complicato: viene allungata lungo la direzione orbitale, compressa nella direzione perpendicolare al piano dell'orbita e sottoposta a violenti stress. Questo fenomeno pone un problema che le simulazioni al computer devono riuscire ancora a risolvere. Nel giro di pochi anni modelli dettagliati elaborati al calcolatore dovrebbero permetterci di calcolare le caratteristiche dei brillamenti (durata, colore, ecc.) che si verificano quando una stella viene disgregata dalle forze di marea di un buco nero. Gli astronomi potranno allora cercare nel cielo indizi del verificarsi di questi eventi catastrofici, che ci forniranno una prova diretta delle condizioni esistenti nelle immediate prossimità del buco.

4. Si potrà trovare un resoconto più completo di queste problematiche legate alle osservazioni, menzionate in questo e nel precedente capitolo, in Mitchell Begelmann e Martin Rees, *Gravity's Fatal Attraction: Black Holes in the Universe*, Freeman, 1966 (tr. it. *L'attrazione fatale della gravità*, Zanichelli, Bologna 1997).

5. Arthur Eddington, a partire dal 1930 in poi, si immerse in una numerologica "teoria fondamentale" che ebbe ben poca risonanza fra i suoi contemporanei (cfr. nota 4 al capitolo 14). Alla fine di una sua conferenza uno studente, alquanto preoccupato, chiese al fisico Samuel Goudsmit che lo seguiva negli studi come avrebbe potuto evitare di fare anche lui quella fine. Goudsmit lo rassicurò: "Non ti preoccupare: solo i geni finiscono così. Noi ci limitiamo a diventare sempre più rimbecilliti".

6

IMMAGINE E SOSTANZA: LE GALASSIE E LA MATERIA OSCURA

Così come si pensa che tutta la Creazione visibile sia ripiena di sistemi siderei e di mondi planetari, così, similmente, l'immensità infinita è un *plenum* illimitato di Creazioni, non altrimenti che l'Universo che conosciamo.

THOMAS WRIGHT DI DURHAM (1752)

È impressionante vedere un'immagine della Terra ripresa dallo spazio durante la notte. A prima vista non sembrano esserci configurazioni. Ma poi si cominciano a cogliere alcune caratteristiche tipiche – le luci delle metropoli, i pozzi di petrolio che ardono nel Medio Oriente, il luccichio dei milioni di fuochi di legna delle cucine nelle conurbazioni indiane – e si cominciano a discernere le familiari figure dei continenti e delle loro coste. Ma la maggior parte delle cose che ci sono sulla Terra non brillano; e se queste fossero le uniche immagini del nostro pianeta, se ne trarrebbero certo inferenze devianti e incomplete.

Eppure, è proprio questa la situazione quando guardiamo il cosmo. I telescopi ottici mantengono la loro importanza centrale, e sono sempre loro a fornirci più informazioni che qualsiasi altra tecnica: le stelle irradiano la maggior parte della loro energia sotto forma di luce visibile e l'atmosfera della Terra è trasparente a questa radiazione. La radioastronomia, tuttavia, offre una finestra particolare sul nostro universo. Gli

oggetti più cospicui del cielo a radioonde sono assai diversi da quelli che dominano le fotografie ottiche.

Non è una coincidenza che i nostri occhi si siano evoluti in modo da essere sensibili alla radiazione dominante del Sole. Ma ci sono molti altri tipi di radiazione (la luce ultravioletta e i raggi X, per esempio) a cui i nostri occhi sono incapaci di rispondere e a cui l'atmosfera della Terra è opaca. L'emissione proveniente da esotici oggetti cosmici si riversa su queste altre bande: per esempio, le osservazioni dei raggi X per mezzo di sonde spaziali (vedi capitoli 4 e 5) sono state cruciali nella ricerca dei buchi neri.

La nostra percezione delle galassie, persino di quelle più familiari, è cambiata in modo spettacolare. Sono dieci volte più grandi e pesanti di quanto si usasse pensare. Le entità osservate dagli astronomi tradizionali, e chiamate "galassie", sono poco più che tracce di sedimenti intrappolati nei centri di enormi sciami di oggetti invisibili di natura del tutto sconosciuta. La gravità di questa materia oscura tiene insieme le galassie e ne modella le strutture.

Questa inedita prospettiva è emersa grazie a tutta una gamma di nuove tecniche che hanno affiancato le fatiche degli astronomi tradizionali. Osservazioni effettuate da sonde spaziali, così come esperimenti sensibilissimi eseguiti nelle viscere delle miniere, stanno dando forma alla nostra nuova concezione di cosa siano in realtà le galassie.

La nostra Galassia e le altre

Sono passati più di 450 anni da quando Copernico detronizzò la Terra dalla posizione privilegiata che Tolomeo le aveva accordato e descrisse la disposizione generale del sistema solare in una forma abbastanza simile a quella oggi accettata. Ma ci si rese conto solo gradualmente che la posizione del Sole non era nemmeno lei speciale. E abbiamo comunque varia strada da fare in questa direzione: la nostra percezione della scala cosmica si va ancora allargando. Nel Settecento William

Herschel interpretò la Via Lattea come una struttura di stelle, a forma di disco piatto, in cui si trovava anche il nostro Sole. Il grande filosofo Immanuel Kant affermò, in quello stesso periodo, che alcune nebulose dovessero essere sistemi a sé stanti, e non parti della Via Lattea. Ma fu solo dopo il 1920 che ci si rese conto che la Galassia (il disco piatto che vediamo nel cielo estivo sotto forma di Via Lattea) altro non era che una galassia del tutto tipica, simile alle centinaia di milioni di altre che potevano essere osservate con un grande telescopio, e che queste sono le unità fondamentali che, su grande scala, costituiscono il nostro universo.

La debolezza apparente delle stelle (altri "Soli") nel nostro cielo notturno ci dice quanto siano disperse rispetto alle loro dimensioni fisiche reali. (Se il Sole venisse ridotto alle dimensioni di una zolletta di zucchero collocata a Milano, le stelle più vicine si troverebbero dalle parti di Palermo.) Non ci sono dunque molti rischi che un'altra stella si schianti contro il nostro Sole o anche che essa si avvicini abbastanza da far sloggiare i pianeti dal sistema solare.

Il Sole orbita intorno al centro della Galassia attratto verso l'interno dalla gravità. Si muove a 250 km/s, completando una rivoluzione in circa duecento milioni di anni (un "anno" galattico). Se la Via Lattea fosse vista da un osservatore lontano, il Sole gli apparirebbe a una distanza dal centro di circa due terzi del raggio del disco, verso il bordo.

Lo zoo delle galassie

Le galassie stanno all'astronomia come gli ecosistemi stanno alla biologia. E ogni galassia attraversa una complessa evoluzione interna. Si può seguire la vita delle stelle – gli organismi individuali di un ecosistema galattico – dalla nascita nelle nubi di gas fino alla loro (a volte esplosiva) morte. Gli atomi di cui sono fatte provengono da tutte le parti della Via Lattea, ma alcuni anche da altre galassie.

Anche ora ci sono nubi di gas interstellari che si stanno

condensando in nuove stelle. Lo Space Telescope ci ha fornito immagini spettacolari della Nebulosa dell'Aquila e di altre nubi di gas e polvere in cui si sta verificando questo fenomeno. Le lucenti stelle azzurre (come, per esempio, il famoso trapezio di stelle di Orione) bruciano il loro combustibile nucleare così velocemente che le loro vite sono relativamente brevi, testimoniandoci così che il processo di formazione delle stelle è un processo che si svolge continuamente. Quando queste stelle muoiono, restituiscono buona parte del loro materiale al gas interstellare. I processi fondamentali che si svolgono nella nostra Galassia costituiscono infatti un "ciclo": il gas si condensa in stelle; una parte di esso in seguito ritorna al mezzo interstellare grazie ai venti stellari e alle esplosioni delle supernove, rendendosi così disponibile per formare nuove stelle.

Ogni atomo di carbonio, azoto e ossigeno del sistema solare fu sintetizzato in stelle antichissime che morirono prima che si formasse il Sole. Parte del materiale che si trasforma poi in stelle rimane però intrappolato per sempre, nel senso che viene incorporato in stelle longeve di massa piccola o nei compatti residui che una stella lascia dietro di sé quando diventa una supernova.

Proprio come il posto dove ci troviamo è un posto tipico della nostra Galassia, così la nostra Galassia esemplifica un tipo comune.[1] Per la maggior parte le galassie possono essere caratterizzate o come sistemi a "disco" o come sistemi "ellittici"; in quest'ultimi le stelle non sono confinate in un disco ma sciamano qua e là in orbite caotiche e ogni stella è attirata gravitazionalmente da tutte le altre.[2]

Nemmeno il "tasso metabolico" è lo stesso in tutte le galassie. I bracci a spirale, così ben visibili nei dischi di alcune galassie, delineano regioni in cui giovani stelle molto brillanti si formano a una velocità inusuale. Sembra esserci nel disco una specie di moto ondoso permanente, ma non si è ancora arrivati a una spiegazione completamente soddisfacente di cosa provocherebbe e manterrebbe tali onde. Le galassie ellittiche hanno consumato la maggior parte del loro gas molto tempo

fa e al loro interno non si formano, ormai, che poche stelle nuove. Le galassie a disco, invece, non sono ancora arrivate così vicine allo stato finale in cui tutto il gas è stato praticamente rinchiuso in stelle di massa piccola o in residui morti.

Alcune galassie sono state deformate dall'attrazione gravitazionale di qualche altra galassia dei dintorni, molto vicina a loro: alcune addirittura collidono e si fondono con una loro compagna. Se potessimo maneggiare una galassia in un laboratorio, potremmo allora sondarla e perturbarla in vari modi per vedere come reagisce: la natura esegue per l'appunto "esperimenti" di questo genere. Naturalmente, i computer possono simulare scontri fra galassie, e con crescente realismo, ma è l'interazione effettiva fra le galassie che ci permette di confrontare queste simulazioni con ciò che accade realmente. Abbiamo imparato come si formano le stelle, perché brillano, come si evolvono. Perché esistano le *galassie* è una questione assai meno semplice del corrispondente problema per le stelle. Le galassie si formarono in un'epoca cosmica primordiale e remota (vedi capitolo 7). Non sappiamo quali caratteristiche possano essere spiegate in termini di processi ordinari accessibili per essere studiati oggi, e quali invece debbano essere fatte risalire a cause e fatti propri dell'universo primordiale – le galassie sono influenzate e dalla loro "genetica" e dal loro ambiente.

Ma c'è un mistero più profondo di cui ci dobbiamo occupare. Con nostro grande imbarazzo, non si sa dar conto del 90 per cento di ogni galassia; ciò che di fatto vediamo non rappresenta più del 10 per cento della loro materia totale. Tutto il resto è presente in qualche forma misteriosa, "oscura". Non andremo molto lontano, è chiaro, senza saperne di più su questo elemento che domina la loro costituzione.

La ricerca della materia oscura

Gli astronomi dell'Ottocento avevano notato che il pianeta Urano deviava dall'orbita prevista. Urbain Leverrier di Parigi

e John Couch Adams di Cambridge sospettarono che fosse l'attrazione gravitazionale di un altro pianeta a causare queste deviazioni e usarono le leggi di Newton per calcolare in quale punto del cielo il perturbatore avrebbe dovuto trovarsi. Nettuno fu così scoperto nel 1846 da Johann Galle dell'Osservatorio di Berlino – e non, è triste dirlo, dai compatrioti di Adams, la cui letargia rappresenta un episodio inglorioso della storia dell'astronomia inglese. (A Cambridge è tuttora conservato un telescopio a rifrazione da 12 pollici, il cui principale titolo di gloria è quello di non essere riuscito a scoprire Nettuno.)

Questa tecnica è fondamentalmente la stessa che viene oggi usata per inferire la presenza di pianeti, non ancora visti, orbitanti intorno ad altre stelle (vedi capitolo 1) e per "pesare" i buchi neri monitorando il moto delle stelle che orbitano vicino a loro (vedi capitolo 5).

Su scale ancora più grandi, gli stessi metodi hanno trasformato la nostra percezione di ciò di cui è fatto il nostro universo. Tutto ciò che osservano gli astronomi si rivela essere una piccola e atipica frazione di ciò che esiste.

I dischi della nostra Galassia e di quella di Andromeda contengono nubi di gas (soprattutto idrogeno) oltre che stelle. Gli atomi di idrogeno emettono radiazioni di lunghezza d'onda caratteristica nella banda delle onde radio. I radioastronomi possono così rilevare queste nubi e inferire, grazie all'effetto Doppler, la velocità con cui si muovono. Alcune nuvole sono molto lontane: orbitano assai al di là dei limiti esterni del disco rilevabili con mezzi ottici. Se questo gas esterno fosse sottoposto soltanto all'attrazione gravitazionale di ciò che possiamo vedere, si dovrebbe muovere più lentamente, proprio come Nettuno e Plutone orbitano intorno al Sole più lentamente della Terra. Ma questo gas lontanissimo si muove altrettanto velocemente del gas più vicino e interno. Il che ci dice che la nostra Galassia è circondata da un alone invisibile, così come, se Plutone si muovesse alla stessa velocità della Terra, dovremmo pensare che esista un pesante guscio invisibile che, restando all'interno dell'orbita di Plutone, avviluppi quella terrestre.

Su scale più grandi ancora – interi ammassi di galassie, del diametro di svariati milioni di anni luce – troviamo lo stesso messaggio. L'argomento, in questo caso, risale a più di sessant'anni fa, a Fritz Zwicky, il fisico svizzero-americano di cui abbiamo discusso nel capitolo 4 le speculazioni sulle supernove e le stelle di neutroni.

I moti casuali delle galassie che costituiscono un ammasso tendono a disperderlo; questa tendenza alla disgregazione è però bilanciata dagli effetti della gravità, la quale – se le galassie non avessero un moto relativo – le farebbe cadere tutte insieme verso il centro dell'ammasso. Le velocità delle galassie (o almeno la loro componente nella direzione della nostra linea di vista) possono essere misurate tramite l'effetto Doppler. Zwicky rimase perplesso nello scoprire che le galassie si muovevano tanto rapidamente: a quella velocità se ne sarebbero dovute volare via dall'ammasso. Perché questo potesse rimanere unito occorreva l'attrazione gravitazionale di qualcosa di gran lunga più pesante delle galassie stesse.[3]

Zwicky propose anche un'altra idea per pesare gli ammassi, che ha potuto essere messa in pratica sul serio solo negli anni Novanta: misurare con quanta intensità essi deflettano la luce. (L'incurvamento dei raggi luminosi provenienti da stelle lontane causato dalla gravità del Sole e osservato durante un'eclissi totale di Sole, offrì una prima, famosa, conferma della teoria della relatività generale di Einstein.) Le immagini degli ammassi, specialmente quelle prese con lo Space Telescope, hanno una risoluzione abbastanza fine da rivelare un gran numero di galassie molto deboli che si trovano assai più lontano dell'ammasso in questione. Alcune di esse appaiono distorte, in forma di lunghe righe o archi, perché la gravità fa agire l'ammasso come se fosse un'enorme lente. Possiamo così inferire la quantità di materia oscura e come essa deve essere diffusa nell'ammasso, grazie al modo preciso con cui gli oggetti dello sfondo vengono distorti e ingranditi. Queste enormi lenti naturali offrono un ulteriore vantaggio agli astronomi

interessati a come si evolvono le galassie, perché ci permettono di vedere galassie remotissime che sarebbero altrimenti troppo deboli per essere osservate.

Senza la materia oscura, gli ammassi di galassie se ne volerebbero via – anzi, gli ammassi non si sarebbero mai nemmeno formati. La materia oscura rappresenta l'influenza gravitazionale dominante nel cosmo: tutti i moti su larga scala delle galassie sono indotti dalla sua attrazione gravitazionale o rispondono a essa. Questa scoperta modifica il nostro punto di vista sull'universo. Ma non abbiamo ragione di stupirci: la materia oscura può assumere anche troppe forme e lo scopo degli osservatori e dei teorici deve essere quello di cercare di restringere il campo delle opzioni possibili.

Che cosa può essere la materia oscura?

Nei suoi ultimi anni Zwicky faceva propaganda a quello che chiamava il "metodo morfologico", una procedura sistematica di elencazione esauriente di tutte le possibilità concepibili. Senza un tale supporto al pensiero creativo, tendiamo, per limiti di immaginazione, a trascurare molte possibilità. Un approccio morfologico è certamente necessario quando ci confrontiamo con il frustrante problema della materia oscura. I candidati più ovvii non esauriscono certamente tutte le opzioni.

I tipi sospetti più comuni sono alcune stelle molto deboli. Le stelle che hanno una massa al di sotto dell'otto per cento di quella del Sole non arrivano mai a condensarsi abbastanza per accendere il combustibile nucleare che permette alle altre stelle di brillare. Sono chiamate "nane brune", termine coniato da Jill Tarter, astronoma americana che è stata fra i primi a teorizzare su di esse. Quante ce ne sono? Fin qui, la teoria non è riuscita a dirci molto. Il rapporto fra il numero di stelle grandi e quello delle piccole è determinato da processi interni alle nubi interstellari; processi complicatissimi, quanto quelli che governano il clima qui sulla Terra. Nemmeno i calcolatori

più potenti possono dirci che cosa succede: questi processi sono intrattabili, per lo stesso motivo per cui è difficile prevedere che tempo farà fra pochi giorni.

Una vasta popolazione di nane brune potrebbe essersi formata quando la Galassia si condensò a partire dal gas primordiale. Forse ci sono oggetti con masse ancora più piccole, più simili ai pianeti che alle stelle.

Ma la materia oscura non potrebbe essere fatta da buchi neri o stelle di neutroni – residui, forse, di antiche generazioni di stelle pesanti morte tutte tanto tempo fa? Questa opzione può effettivamente venir scartata – sfoltire la lista dei candidati è comunque un progresso. La stella-precursore di un residuo del genere avrebbe prodotto durante la sua vita attiva e luminosa carbonio, ossigeno e altri elementi della tavola periodica. Il materiale trattato sarebbe stato espulso, dai venti stellari o dalle esplosioni delle supernove. Se ci fossero abbastanza residui da costituire la materia oscura della nostra Galassia, allora le loro stelle-progenitrici avrebbero prodotto molto, ma molto più carbonio, ossigeno e ferro di quello che in realtà troviamo.

C'è un modo di sfuggire a questa conclusione: forse questi atomi pesanti sono tutti *caduti dentro* ai buchi neri residui, invece di venir dispersi in un'esplosione. Ciò avrebbe potuto accadere solo se le stelle-progenitrici avessero pesato centinaia di volte più del Sole. Tali stelle ultramassicce non sarebbero mai esplose. Esaurito il loro combustibile nucleare, invece, la pressione centrale sarebbe improvvisamente crollata ed esse sarebbero implose in un buco nero che si sarebbe ingoiato tutto il materiale elaborato nella stella. Oggi come oggi, però, in nessun posto riusciamo a vedere che si stiano formando stelle così pesanti. Ma quando la Galassia era giovane, in epoche remote, avrebbe potuto essere stata tutta illuminata da una generazione di stelle ultramassicce; i loro residui potrebbero oggi costituire la materia oscura.

La materia oscura potrebbe dunque trovarsi in pesanti buchi neri o nelle nane brune. Queste sono le opzioni più semplici, che comportano solo modeste estrapolazioni (conside-

rando cioè masse più grandi o più piccole) rispetto alle stelle comuni. Ma se siamo pronti a estrapolare ulteriormente, ci sono altre opzioni: piccoli corpi, simili a rocce, o blocchetti di idrogeno congelato, per esempio. Zwicky stesso (seguendo il suo metodo morfologico) speculava sull'esistenza di "*gremlins*"* nucleari: pezzetti di materia densa quanto quella di una stella di neutroni. Edward Witten, il grande fisico matematico di Princeton, ha avanzato idee simili. Proponeva le "pepite di quark", frammenti di materia "congelata" in un'esotica fase molto densa, sopravvissuti dalle primissime fasi dell'universo.

Alla ricerca di lenti

Gli oggetti pesanti, anche quelli oscuri, incurvano i raggi luminosi che gli passano vicini. Possono agire come lenti, poiché ingrandiscono stelle più lontane facendo convergere la loro luce verso di noi. Se un corpo oscuro (una nana bruna o un buco nero, per esempio) si muovesse lungo la linea di vista di una stella sullo sfondo, l'ingrandimento aumenterebbe, raggiungendo il massimo quando l'allineamento è al culmine, per poi diminuire di nuovo; la stella sullo sfondo, conseguentemente, aumenterebbe e diminuirebbe la sua luminosità in modo prevedibile. L'allineamento richiesto è molto esatto, cosicché il fenomeno non dovrebbe verificarsi molto spesso: persino se esistessero abbastanza nane brune da costituire tutta la materia oscura della nostra Galassia (e ce ne vorrebbero svariate migliaia di miliardi!), la probabilità che una data stella sullo sfondo sia vista ingrandita è meno di uno su un milione.

Per avere una possibilità di scoprire un'immagine stellare ingrandita o si è disposti ad aspettare molto tempo, o (più ottimisticamente) bisogna far crescere le probabilità osservando

* I *gremlins* sono folletti che si diceva infestassero gli aerei della Seconda Guerra Mondiale. [NdT]

non una, ma milioni di stelle sullo sfondo. Fino a poco tempo fa questo sembrava un compito spaventevole. Ma nel 1993 un gruppo di scienziati statunitensi e australiani hanno dato una seconda giovinezza a un derelitto telescopio centenario, equipaggiandolo con rivelatori di luce all'ultimo grido e con meccanismi di controllo computerizzati; e alcuni scienziati francesi hanno utilizzato un piccolo telescopio cileno per un progetto simile. Entrambi i gruppi hanno monitorato, notte chiara dopo notte chiara, vari milioni di stelle di una piccola galassia vicina (circa 150 mila anni luce), la Grande Nube di Magellano. E alcuni astronomi polacchi, utilizzando un piccolo osservatorio cileno, hanno ricercato fenomeni dovuti a lenti gravitazionali verso il centro della nostra Galassia, dove la concentrazione stellare è maggiore.

Molti astronomi campano studiando stelle pulsanti, sistemi binari e stelle variabili; le loro rassegne producono un ricco raccolto di stelle di questo tipo. Ma per coloro che cercano prove di ingrandimenti gravitazionali, le stelle *intrinsecamente* variabili rappresentano un disturbo. La sfida è quella di riuscire a cogliere le rare occorenze di quella variabilità *apparente*, caratteristica di un fenomeno di ingrandimento dovuto a una lente gravitazionale: un aumento e una diminuzione simmetrica, senza cambiamento di colore.

Sono già stati scoperti vari eventi dovuti a lenti, esattamente del tipo che potrebbero venir causati da piccole stelle deboli presenti nell'alone galattico. Ma se queste stelle fossero in numero sufficiente da costituire l'intera massa dell'alone, si sarebbe dovuto osservare almeno il doppio di eventi di quelli effettivamente visti. Dobbiamo quindi continuare la ricerca di un altro candidato per la materia oscura. (Sarebbe più difficile, però, scoprire in questo modo i buchi neri. Anch'essi provocherebbero un effetto-lente, ma più raramente e con un aumento e una diminuzione molto meno marcati.)

En passant, i ricercatori che sono stati all'avanguardia di questi effetti-lente avevano poca esperienza come osservatori. Le loro competenze provenivano o dalla fisica delle particelle o dall'astrofisica teorica. Non c'era niente di speciale nei tele-

scopi o negli strumenti occorrenti, ma bastava la pura e semplice quantità di dati da analizzare a spaventare gli astronomi "tradizionali". I fisici, abituati agli esperimenti con gli acceleratori di particelle, in cui vengono registrati milioni di collisioni, e di questi milioni quelle interessanti si possono quasi contare sulle dita, si fanno scoraggiare meno facilmente da difficoltà simili e i teorici – forse – nemmeno apprezzavano questo tipo di difficoltà. Qualunque sia l'esito finale di questa ricerca, gli ottimisti hanno trionfato. È veramente fattibile monitorare milioni di stelle e usare i calcolatori per cogliere quella che, occasionalmente, varia in modo caratteristico.

Reliquie della Palla di Fuoco nella materia oscura?

Sarebbe in un certo senso deludente se si scoprisse che tutta la materia oscura è costituita da stelle di massa piccola o da buchi neri. I fisici sarebbero certo molto più eccitati all'idea che ci siano di mezzo anche particelle esotiche. Queste particelle vengono prodotte nelle stelle molto calde e nell'universo primordiale. In effetti, i neutrini rimasti dopo la Palla di Fuoco cosmica dovrebbero essere almeno altrettanto abbondanti dei fotoni: sembra che ce ne siano centinaia di milioni per ogni atomo esistente nell'universo. Siccome il numero dei neutrini supera così largamente quello degli atomi, essi potrebbero essere la componente gravitazionale dominante anche se ciascuno di essi pesasse solo un centomilionesimo di un atomo. Prima degli anni Ottanta, tuttavia, quasi tutti credevano che i neutrini fossero particelle con massa a riposo nulla; in questo caso essi si muoverebbero alla velocità della luce e trasporterebbero energia, ma i loro effetti gravitazionali sarebbero trascurabili. (Allo stesso modo, i fotoni rimasti dalle prime fasi dell'universo, rilevati sotto forma di radiazione di fondo a microonde, non esercitano alcun effetto gravitazionale significativo.)

Nel 1979 Valentin Ljubimov di Mosca affermò di aver misurato la massa di un neutrino. Il suo esperimento non fu mai

ripetuto e la maggior parte dei fisici oggi non lo considera molto importante. Ma esso stimolò i cosmologi a prendere più sul serio la possibilità di una massa non nulla. Nel 1995 un gruppo di ricerca di Los Alamos ha annunciato un risultato analogo, ma utilizzando tecniche diverse. Anche questo, tuttavia, è piuttosto controverso. La pubblicazione era firmata da 39 autori, ma un membro dissidente del gruppo pubblicava, nello stesso numero di quella rivista, una sua analisi dei dati, raggiungendo la conclusione opposta! Le osservazioni o gli esperimenti, anche quando si rivelano poi sbagliati, spesso forniscono uno slancio positivo alla ricerca, non foss'altro perché stimolano i teorici a esplorare nuove possibilità che altrimenti avrebbero potuto essere trascurate.

Anche la supernova esplosa nelle nostre vicinanze nel 1987 (vedi capitolo 1) ha offerto alcuni indizi a proposito della massa del neutrino. Il repentino collasso del nucleo di una stella che fa da detonatore per l'esplosione della supernova (e che lascia come residuo una stella di neutroni o un buco nero) libera un impulso colossale di energia che sfugge via, principalmente sotto forma di neutrini. Ci sono circa 10^{57} atomi nel nucleo che sta collassando; per ogni atomo vengono creati svariati neutrini, cosicché la supernova dovrebbe generarne complessivamente circa 10^{58}. Gli atomi ordinari sono quasi trasparenti ai neutrini: quasi tutti i neutrini che colpiscono la Terra le passano dritto dritto attraverso. Alcuni di essi, però, sono stati rivelati da alcuni strumenti molto sensibili. In un esperimento giapponese, effettuato nel profondo di una miniera di sale (Kamiokande), furono registrati 11 eventi; in uno americano (in una miniera di zinco dell'Ohio) altri 8. Numeri questi che piacquero agli astrofisici: infatti si adattavano bene a ciò che predicevano le teorie sulle supernove.

Questi esperimenti ci dicono anche qualcosa sulla massa del neutrino. Se tale massa fosse diversa da zero, i neutrini provenienti da una supernova si muoverebbero quasi alla velocità della luce, ma solo *quasi*. Quelli rilevati nel 1987, dopo aver viaggiato per 170.000 anni luce dalla supernova fino a noi, arrivarono tutti a distanza di pochi secondi uno dall'altro.

Il che escludeva che il neutrino potesse avere una massa grande come quella che Ljubimov pretendeva che avesse. Ma i neutrini sono ancora in corsa nella gara fra i candidati per la materia oscura: ne esiste un altro tipo, il cosiddetto "tau" (τ), neutrino che dovrebbe essere più pesante di quelli che ci arrivano dalle supernove. La materia oscura potrebbe dunque esser fatta da τ neutrini sopravvissuti alle prime fasi dell'universo primordiale.*

I neutrini, almeno, esistono. Ma i teorici delle particelle hanno una lunga lista della spesa: particelle che *potrebbero* esistere e (se così fosse) potrebbero essere sopravvissute alle prime fasi del Big Bang. Queste particelle ipotetiche, pesanti ma elettricamente neutre, passerebbero, come i neutrini, dritte attraverso la Terra. Un'esigua parte, tuttavia, interagirebbe con un atomo dei materiali che attraversano, rilasciando una minuscola quantità di calore o di suono che potrebbe essere misurata in esperimenti molto sensibili. Per rilevare questi rari eventi – forse uno al giorno per ogni chilogrammo di materia – gli sperimentatori devono andarsi a sotterrare a grandi profondità, per ridurre il "rumore di fondo" di altri tipi di eventi che potrebbero confondere o sommergere il segnale che stanno cercando. Vari gruppi di fisici hanno raccolto la sfida.[4]

Solo un ottimista sfrenato sarebbe disposto a scommettere, se non alla pari, che chi si consacra a questi esperimenti sotterranei nel fondo delle miniere riuscirà a scoprire checchessia. Ma il fine è tale che ne vale la pena. Un risultato positivo non solo rivelerebbe una nuova classe di particelle elementari che non potrebbero mai venir prodotte in un acceleratore terrestre, ma ci direbbe anche di cosa sia intessuta la stoffa di cui è fatto il novanta per cento del nostro universo: si tratterebbe di un successo di tale momento da stare almeno sullo stesso piano della scoperta di Penzias e Wilson quando, negli anni Sessanta, rilevarono la radiazione cosmica di fondo.

* Nel 1998 i fisici di Kaiokande hanno annunciato risultati che confermerebbero una massa del neutrino non nulla. Tale massa, però, non è stata ancora determinata. [NdT]

I teorici della materia oscura non sono più liberi di teorizzare senza limiti. Si stanno compiendo serie ricerche di vari candidati possibili. Le lenti gravitazionali potrebbero scoprire un numero sufficiente di nane brune o di buchi neri; gli esperimenti sotterranei potrebbero rivelare un qualche nuovo tipo di particella che pervade il nostro alone galattico, o almeno stabilire dei limiti alle opzioni sostenibili. Dovremo però smorzare le speranze di progressi rapidi: si noti che il nostro universo è costituito principalmente da entità la cui massa può andare da 10^{-33} (particelle esotiche) fino a 10^{39} grammi (buchi neri pesanti). C'è, in altre parole, un'indeterminazione di oltre 70 potenze di dieci. L'astrofisica non sarà una scienza esatta, va bene, ma raramente l'indeterminazione è così grossolana.

Non è però una forma di *wishful thinking* aspettarsi che esista più di un tipo di materia oscura. Potrebbe darsi che le particelle esotiche pervadano i grandi ammassi e i superammassi, anche se le singole galassie potrebbero essere tenute insieme dalla gravità delle nane brune e dei buchi neri.

Ma non saremo per caso fuori strada?

La prova fondamentale dell'esistenza della materia oscura è che i gas e le stelle si muovono nelle galassie con velocità sorprendente. I materiali esterni rimarrebbero senza legami e se ne volerebbero via dalla loro galassia se fossero sottoposti solo alla gravità della galassia che possiamo vedere. Nel trarre questa inferenza utilizziamo la nostra teoria standard della gravità che, nel caso specifico, si riduce alla legge di Newton dell'inverso del quadrato. Legge questa che è stata controllata direttamente solo all'interno del sistema solare: è letteralmente un salto nel buio applicarla su scale di centinaia di milioni di volte più grandi. (Detto *en passant*, ci sono stati recentemente tentativi di controllare la legge dell'inverso del quadrato su scale molto piccole. Questi tentativi sono motivati dall'idea che, su distanze di pochi metri, possa entrare in gioco una certa "quinta forza". Anche in questo caso le prove sperimentali

dirette sono scarne, dato che fra oggetti delle dimensioni di quelli utilizzabili in un laboratorio la gravità è molto debole.)

Una legge della gravità diversa, operante sulle lunghe distanze, non potrebbe per caso ovviare al bisogno di una "materia oscura"? Un fisico israeliano, Mordehai Milgrom, congettura che la legge di Newton dell'inverso del quadrato – che vuole che la forza dipenda da $\frac{\text{massa}}{r^2}$ – diventi errata (e sottostimi la vera forza di gravità) quando la forza è più debole di un certo particolare valore. Questa proposta, nota come MOND (un acronimo per MOdified Newtonian Dynamics, Dinamica Newtoniana MOdificata), non violerebbe nessun esperimento od osservazione fin qui noti, ma permette a Milgrom di reinterpretare gran parte dei dati senza dover invocare l'esistenza della materia oscura.

Milgrom ha reso un servizio utile a tutti analizzando seriamente che cosa servirebbe per sfuggire alla necessità di postulare l'esistenza della materia oscura. Ha anche suggerito alcuni controlli: per esempio, la teoria MOND potrebbe dar luogo a configurazioni di moti stellari in una galassia che nel contesto tradizionale non potrebbero mai verificarsi, perché richiederebbero che in alcune regioni esista una densità *negativa* di materia oscura. Altri controlli riguardano l'effetto della gravità sui raggi luminosi. Le teorie "convenzionali" predicono come i raggi di luce vengano deflessi da un oggetto dotato di massa; sia la materia oscura che quella "luminosa" contribuiscono a questo incurvamento. La teoria MOND è meno specifica su questo punto, perché la gravità modificata potrebbe non rinforzare l'incurvamento della luce dello stesso fattore con cui rinforza l'intensità della gravità che agisce su stelle e gas.

Ma perché ci dovremmo spingere tanto lontano per evitare di postulare l'esistenza della materia oscura? Perché mai tutta, o quasi tutta, la materia gravitante dell'universo dovrebbe risplendere? La materia oscura può assumere molte forme, e nessuna di esse sembra proprio da escludere *a priori*. La sfida in campo è sicuramente quella di discriminare fra le tante opzioni e restringere la lista dei candidati. Se, in un qualche futuro, la ricerca della materia oscura non avesse portato assolutamente a nulla e tutte le opzioni credibili fossero state eliminate, allora potrebbe esserci una motivazione più forte per la teoria MOND.

La proposta di Milgrom sembra poco attraente anche per un altro motivo (dal mio punto di vista, se fosse in vendita in un supermercato, sarebbe l'ultima cosa che mi verrebbe in mente di comprare). Butta a mare uno dei trionfi della fisica, la teoria della gravità einsteiniana, che incorpora ed estende quella di Newton, una teoria che è sopravvissuta a controlli sperimentali sorprendentemente precisi. L'idea di MOND, come Milgrom stesso sa bene, distruggerebbe completamente l'integrità della teoria di Einstein. E non si tratterebbe di riaggiustamenti minori o di sostituire pezzi difettosi: ci ritroveremmo in uno stadio prenewtoniano. Un prezzo piuttosto alto da pagare.

Come sfoltire la lista

Sarebbe certo di particolare interesse se un qualche tipo di particella ancora sconosciuto, sopravvissuto all'universo primordiale, potesse dar conto della materia oscura. Ma in questo caso dovremmo vedere le galassie, le stelle e noi stessi da tutt'altro punto di vista. Copernico detronizzò la Terra dalla sua posizione al centro dell'universo. All'inizio di questo secolo Shapley e Hubble ci hanno negato ogni possibilità di trovarci in una posizione privilegiata dello spazio. Ma adesso persino lo *sciovinismo particellare* potrebbe dover essere abbandonato: i protoni, i neutroni e gli elettroni di cui noi, e l'intero mondo astronomico siamo fatti potrebbero rappresentare solo una specie di ripensamento, in un cosmo in cui neutrini e particelle esotiche controllerebbero la dinamica complessiva. Le grandi galassie potrebbero essere solo un "budino" di atomi, tenuto insieme da una sostanza gravitante almeno dieci volte superiore, sparsa per l'universo in qualche forma sconosciuta e del tutto diversa.

Non sappiamo ancora che tipi di particelle possano essere esistiti nelle primissime fasi dell'universo primordiale, né quante di loro possano essere sopravvissute. La risposta dipende dalle leggi prevalenti nella fisica delle altissime energie, e questa fisica è ancora indeterminata. Quando queste leggi saranno state chiarite, dovremmo poter predire quali e quante particelle "fossili" possano essere sopravvissute al primo millisecondo di vita con altrettanta sicurezza di quella con cui possiamo oggi predire la quantità di elio sopravvissuta ai primi tre minuti (vedi capitolo 3). Quanta più materia oscura esiste, tanto più l'espansione cosmica sta decelerando: se ce ne fosse abbastanza, l'espansione potrebbe finire con l'arrestarsi. La materia oscura non solo modella l'attuale struttura del nostro universo, ma determina anche il suo destino ultimo.

La materia oscura domina le galassie. Come esse si formino, a che cosa assomiglino e il modo con cui si ammassano dipende da come si è comportata la materia oscura durante l'espansione dell'universo. Possiamo fare diverse ipotesi sulla materia oscura e per ciascuna di esse calcolare il risultato. E vedere così quale si avvicini di più a ciò che effettivamente osserviamo. Questi calcoli, che discuteremo ulteriormente nel capitolo successivo, possono offrirci indizi indiretti su ciò che la materia oscura possa essere.

Gli atomi ordinari costituiscono meno del dieci per cento dell'universo, in termini di massa: la dinamica del cosmo subirebbe solo lievi modifiche se non esistessero affatto. Ma non c'è dubbio che gli atomi siano un prerequisito per la nostra esistenza. Senza di essi un universo non può ospitare stelle, non ci può essere chimica, non ci può essere complessità – se non molto poca. Gli atomi saranno anche stati un ripensamento, ma senza di essi l'universo sarebbe stato solo un mondo sterile.

NOTE

1. Gli astronomi hanno elaborato una complessa tassonomia delle galassie sulla base delle loro dimensioni, forme, e tipi di stelle prevalenti. Gérard de Vaucouleurs, l'autorità mondiale in fatto di morfologia galattica, ha formulato uno schema in più di cento categorie, e anche questo non riesce a comprendere tutti i sistemi "peculiari".

2. Nemmeno le immagini migliori e più fini delle galassie possono riuscire a cogliere le singole stelle di cui sono fatte, se non quelle particolarmente luminose e solo nelle galassie più vicine a noi.

3. L'astronomia a raggi X offre un altro strumento per diagnosticare l'esistenza della materia oscura negli ammassi di galassie, così come all'interno delle singole galassie ellittiche. Questi sistemi sono pervasi da gas caldo molto rarefatto, che è chiaramente trattenuto nell'ammasso della gravità. Grazie alle emissioni di raggi X possiamo inferire la temperatura e la pressione del gas. Il gas è così caldo che non potrebbe in nessun modo restarsene nell'ammasso a meno che non vi sia trattenuto da una forza gravitazionale più forte di quella che le stelle da sole possono fornire.

4. Siccome il sistema solare sta orbitando intorno alla Galassia spazzando l'alone (il quale a sua volta ruota più lentamente del disco della nostra Galassia), gli impatti si verificherebbero preferenzialmente con particelle provenienti dalla direzione in cui ci stiamo muovendo. Questa tendenza può distinguere gli eventi genuini da quelli dovuti ad altri effetti, per esempio alla radioattività delle rocce. Inoltre, la velocità della Terra relativamente alla media delle particelle dell'alone non è la stessa nei vari mesi dell'anno, dato il nostro moto intorno al Sole. Il tasso di rilevamento dovrebbe, dunque, variare nel corso dell'anno. Una tale modulazione annuale, con un'ampiezza di pochi punti percentuali e un picco in giugno, mostrerebbe che gli eventi rilevati sono genuinamente dovuti a impatti con particelle cosmiche anche se non sapessimo nulla della direzione da cui provengono.

7

DALLE INCRESPATURE PRIMORDIALI ALLE STRUTTURE COSMICHE

Una via di fuga dalla stretta gabbia del nostro universo; stretta, a dispetto di tutte quelle vaste e inconcepibili distese di spazi degli astronomi; stretta perché è solo un'estensione continua, senza fine desolata, priva di senso e di ogni significato.

D.H. LAWRENCE

L'hardware

L'astronomia è stata la prima (forse con l'eccezione della medicina) scienza "professionistica", anche se c'è sempre stato un forte interesse amatoriale. Fu certo la prima scienza che utilizzasse attrezzature grandi e costose. I telescopi settecenteschi che usava William Herschel – costruzioni elaborate e massicce – contrastano con le modeste attrezzature che utilizzavano i suoi contemporanei Lavoisier e Cavendish, i cui "laboratori" avrebbero potuto occupare poco più di un tavolo da cucina. L'astronomia è stata, senz'altro, la prima *big science*: già nel Cinquecento il progetto di Tycho Brahe di catalogare le stelle ottenne tali finanziamenti dal re di Danimarca che Tycho poté costruirsi un osservatorio delle dimensioni di una cattedrale nell'isola di Hven (oggi purtroppo non ne è rimasto nulla). Le spedizioni settecentesche nell'Oceano Pacifico per osservare i transiti di Venere (e fissare di conseguenza le dimensioni del sistema solare) rappresentarono imprese costose per gli standard dell'epoca.

Con le leggi di Newton come sola guida, gli astronomi del Settecento potevano compilare effemeridi accurate che predicevano le posizioni dei pianeti nel cielo. Il firmamento stellato veniva allora considerato come lo sfondo fisso dei moti del sistema solare. L'idea che anche le stelle si muovessero risale alla fine del XVIII secolo; fu verso quell'epoca che furono scoperti per la prima volta i piccoli moti *relativi* delle stelle. Ci si rese conto che alcune stelle orbitavano in sistemi binari, intorno a una compagna, confermando così che le leggi di Newton valevano anche nel regno dei cieli. Ma il Sole e le stelle erano ancora oggetto di congetture fantasiose: William Herschel, per esempio, nonostante i suoi sofisticati studi sui moti delle stelle e su come fossero distribuite nello spazio, pensava che il Sole potesse essere abitato.

Con l'introduzione della lastra fotografica nel corso dell'Ottocento l'astronomia ricevette un forte impulso: oggetti deboli, invisibili finché si guardava direttamente col telescopio, si mostravano chiaramente in fotografie a lunga esposizione. Le belle e scintillanti immagini che si vedono sui libri e sui *poster* mettono fuori strada. La luce che proviene dalle galassie, sostanzialmente frutto del contributo medio di un enorme numero di stelle, è a mal fatica rilevabile nel luccichio del cielo notturno, e solo lunghe esposizioni ce la mostrano chiaramente. Quando la luce è poi separata nei suoi colori costitutivi da uno spettrometro, essa ci rivela di che cosa siano fatti i corpi celesti: questa idea, che risale anch'essa al XIX secolo, diede inizio all'astrofisica come scienza.

Per tutto il XX secolo ci fu un incessante miglioramento tecnico e furono costruiti telescopi sempre più grandi. Negli anni Ottanta esistevano ormai più di una dozzina di telescopi con specchi di diametro maggiore di quattro metri. La loro strumentazione è stata aggiornata e resa più sensibile ed efficace, via via che la tecnologia progrediva.[1]

Il modo più sicuro di scoprire gli oggetti più deboli è quello di utilizzare specchi più grandi per raccogliere più luce. Il primo di questi strumenti "di nuova generazione" è il Keck Telescope di Mauna Kea nelle isole Hawaii, che è stato terminato nel 1994. Ha uno specchio di dieci metri (che in effetti è un mosaico costituito da 36 elementi esagonali) e raccoglie quattro volte più luce dei telescopi precedenti; gli oggetti deboli si mostrano molto più chiaramente.[2] Si stanno costruendo vari altri telescopi con specchi di 8-10 metri e c'è ormai un secondo Keck accanto al primo. Ma il "Keck 1" ha avuto un vantaggio di vari anni su tutti gli altri.

Lo Hubble Space Telescope, che orbita ben al di sopra degli effetti distorcenti e annebbianti dall'atmosfera, è tuttora, da certi punti di vista, uno strumento unico, soprattutto in grazia della nitidezza delle immagini che ci fornisce. Ma avrebbe potuto avere un impatto ben maggiore se – com'era previsto – fosse stato messo in orbita all'inizio degli anni Ottanta, prima che fossero stati realizzati questi grandi progressi nei telescopi al suolo. A causa dei ritardi del programma della NASA relativo allo *shuttle* (in parte causati dal disastro del *Challenger* nel 1986), i suoi rivelatori di luce erano ormai sorpassati da una decina d'anni quando venne lanciato. E, dopo che fu messo in orbita, si scoprì che le sue immagini erano malamente sfocate, perché lo specchio principale era stato montato scorrettamente. Gli esperti di *management* potrebbero ricavare interessanti insegnamenti da questa storia, e da tutto ciò che andò storto: il lavoro e la responsabilità erano troppo diffusi; durando così tanto tempo, ci furono troppi cambi di personale; non c'era una sola persona che avesse le competenze, l'autorità e la dedizione per controllare tutti gli aspetti del lavoro.

Con il volo di un altro *shuttle*, lo Space Telescope fu fatto visitare da una squadra di astronauti quando era ormai in orbita, in modo da sostituire le parti difettose e correggere i meccanismi ottici. Così lustrato a nuovo, fu presentato come un trionfo del volo spaziale umano: gli astronauti eseguirono la loro complicata missione senza un errore. Ma se il criterio primo avesse dovuto essere quello del rapporto costi-benefici, sarebbe stato meglio abbandonare al suo destino quel primo iellato telescopio e metterne in orbita una versione aggiornata. Anzi, l'intero programma dello Space Telescope sarebbe

stato molto meno caro e avrebbe avuto assai meno ritardi se fosse stato fin dall'inizio separato dal programma "umano" (e da quello dello *shuttle* della NASA). Secondo Riccardo Giacconi (che passò dall'astronomia dei raggi X descritta nel capitolo 4 a dirigere per primo lo Space Telescope Science Institute, responsabile quindi del funzionamento del telescopio in orbita), con quello che si era speso per lanciarne uno solo, se ne sarebbero potuti mettere in orbita altri *sette* simili, utilizzando missili "usa e getta" per ciascuno di essi. Ma anche in questo caso ognuno di quei telescopi sarebbe costato varie volte di più del più grande telescopio al suolo.

Parallelamente ai progressi nel campo della strumentazione si è verificato un analogo sviluppo in quello dei calcolatori. In meno di un secondo un calcolatore può sorpassare diecimila vite di calcoli umani. Queste simulazioni, o "esperimenti numerici" aprono una nuova dimensione. Possiamo calcolare nei dettagli le conseguenze di varie teorie e vedere quali siano le ipotesi che producono il riscontro migliore con le osservazioni – sempre più precise – che i telescopi ci offrono. Le disparità fra l'universo reale e quello immaginato ci dicono dove le nostre ipotesi sono errate e (con un po' di fortuna) ci guidano verso una comprensione migliore.

Tre problemi sulle galassie

Ci sono alcuni problemi fondamentali sulle galassie. In primo luogo occorre chiedersi perché cose del genere esistano. Perché questi assembramenti di stelle e di gas sono le unità su vasta scala più cospicue del cosmo? Le galassie hanno dimensioni caratteristiche, anche se, come nel caso delle stelle, ce ne sono un po' di tutte le taglie, sopra e sotto una media. Ma c'è una qualche teoria fisica che discrimini le dimensioni delle galassie, così come, dopo i lavori di Eddington e di Chandrasekhar, siamo riusciti a capire quale sia la scala naturale delle stelle? In qualche misura le galassie devono essere determinate dalla cosmologia – non esisterebbero affatto se non ci fosse-

ro state le condizioni "iniziali" dell'universo in espansione che permettessero la condensazione di nubi di gas abbastanza grandi. C'è ovviamente, però, qualcosa che determina in che punto della gerarchia delle masse finiscano le *galassie individuali* e comincino invece gli *ammassi di galassie*. L'Ammasso della Chioma, per esempio, consiste di un migliaio di galassie distinte, ciascuna delle quali contiene qualcosa come 10^{11} stelle. Ma perché non c'è invece un'enorme agglomerato di 10^{14} stelle?

C'è poi il fatto, piuttosto imbarazzante, che abbiamo discusso nel capitolo precedente, che non sappiamo dar conto della maggior parte della loro massa, forse addirittura del 90 per cento: essa non si trova nelle stelle e nel gas che vediamo, ma assume una qualche forma "oscura". È chiaro che non capiremo mai veramente le galassie fino a che non comprenderemo cosa sia la materia dominante la cui gravità le fa stare insieme.

In terzo luogo c'è il fatto che alcune galassie sono qualcosa di più che una semplice concentrazione di stelle, gas e materia oscura: la loro produzione di energia proviene principalmente da una concentrazione che si trova nel loro centro, probabilmente un massiccio buco nero. Questi "nuclei galattici attivi" danno luogo a ulteriori problemi. Perché alcune galassie splendono come fiaccole e rilasciano quella colossale quantità di energia che le trasforma in quasar e in radio-galassie? (Vedi capitoli 2 e 5.)

Galassie embrionali

La gravità rende instabile un universo uniforme. Se ne era accorto già lo stesso Newton, almeno nel caso di un universo *statico*. In una lettera a Richard Bentley, *Master* del Trinity College e studioso di antichità classica, Newton scriveva:

> Mi sembra che se la materia del nostro Sole e dei pianeti e tutta la materia dell'universo fosse egualmente dispersa nei cieli e ogni particella possedesse una gravità innata verso tutte le

> altre, e [...] se la materia fosse dispersa in uno spazio infinito, essa non potrebbe mai ridursi in una sola massa; ma una parte di essa si aggregherebbe in una massa e un'altra parte in un'altra, in modo da formare un infinito numero di grandi masse, disperse a gran distanza l'una dall'altra nell'infinità dello spazio. E questo potrebbe essere stato il modo con cui il Sole e le stelle fisse si sono formate [...].

Anche in un universo *in espansione* la gravità fa essenzialmente la stessa cosa che Newton aveva intravvisto. Qualsiasi regione leggermente più densa della media decelera maggiormente, a causa della sua maggiore gravità; la sua espansione resterebbe sempre più indietro rispetto a quella media, e il contrasto di densità crescerebbe. (Se lanciamo due palle verso l'alto con una lieve differenza di velocità iniziale, le loro traiettorie inizialmente differiscono solo impercettibilmente. Ma la palla più lenta si fermerà completamente e comincerà a scendere quando l'altra si starà ancora muovendo verso l'alto.)

Un universo che fosse stato *completamente* liscio e uniforme all'inizio della sua espansione sarebbe rimasto tale anche dopo dieci miliardi di anni. Sarebbe un universo freddo, e noioso: niente galassie, niente stelle, niente elementi chimici, nessuna complessità e sicuramente nessuna persona. Ma sarebbe bastato che gli scostamenti iniziali dall'uniformità fossero stati molto lievi: i contrasti di densità si sarebbero amplificati nel corso dell'espansione, cosicché persino minime "increspature" in una Palla di Fuoco primordiale quasi completamente amorfa si sarebbero potute evolvere in strutture cospicue.

Nei suoi primi stadi molto compressi il nostro universo era molto più denso di quanto lo siano oggi le singole galassie. In quell'epoca, ovviamente, le galassie non sarebbero potute esistere come entità separate: i loro embrioni sarebbero stati semplicemente regioni dotate di una densità leggermente maggiore, la cui espansione successiva sarebbe stata ritardata e infine arrestata dal loro surplus di gravità.

Come le singole galassie, gli ammassi e i superammassi sono il risultato di un'aggregazione gravitazionale. Le galassie

appena formate non si sarebbero diffuse in modo totalmente uniforme; ce ne sarebbero state un po' di più in alcuni posti piuttosto che in altri. Via via che l'espansione procedeva, ogni volume di spazio contenente massa in eccesso avrebbe subito una maggiore decelerazione, cosicché le galassie presenti in quei volumi finirono con l'addensarsi molto più della media.

Non c'è nulla di "fondamentale" nella configurazione precisa delle galassie nel nostro cielo; ma ogni teoria minimamente decente dovrebbe riuscire a spiegare le proprietà *statistiche* delle galassie e della loro distribuzione. Un po' come l'oceanografia spera di riuscire a spiegare la statistica delle onde oceaniche – le loro caratteristiche *medie* – ma non la configurazione precisa delle creste d'onda che si possono osservare in una foto presa in un dato momento e in un dato luogo.

Vorremmo poter interpretare il nostro ambiente cosmico attuale come il risultato generico di una qualche ipotesi semplice e "naturale" sull'universo primordiale. Le galassie (e gli ammassi e i superammassi) possono veramente essersi evolute da fluttuazioni iniziali? Da fluttuazioni che (come vedremo nel capitolo 10) potrebbero essere state impresse al nostro universo quando non era più grande di una palla da golf?

Universi nei calcolatori

Una regione abbastanza grande da costituire un buon campione statistico del nostro universo contiene svariate migliaia di galassie: il che fa un qualcosa come 10^{72} atomi, con in più, forse, un altro bel po' di quelle particelle – quali che siano – che costituiscono la materia oscura. Ovviamente, non c'è computer immaginabile che possa simulare tutti i dettagli su piccola scala. Fortunatamente una simulazione a grana grossa può bastare, almeno se siamo interessati alle proprietà globali delle galassie e al modo in cui si muovono.

Una foto stampata su un quotidiano utilizza solo poche migliaia di punti, eppure riesce a darci un'immagine che riconosciamo come un volto. Possiamo così imparare qualcosa an-

che da calcoli drasticamente semplificati, in cui ogni galassia è rappresentata da diecimila "particelle". L'intera regione che viene simulata conterrà dunque complessivamente 10^8 "particelle". I calcolatori sono abbastanza potenti da seguire tutti questi corpi e calcolare la forza gravitazionale, dovuta all'attrazione di tutti gli altri, che si esercita su ciascuno di essi.

Se le "particelle" all'inizio si trovano in una configurazione completamente regolare, la loro evoluzione sarà molto semplice: si espanderanno allontanandosi le une dalle altre in esatto accordo con gli "universi modello" proposti da Fridman e Lemaître. Ma supponiamo che le "particelle" non vengano distribuite con completa uniformità all'inizio dei calcoli. Le regioni in cui esse venissero impacchettate con una densità solo dell'uno per cento superiore alla media subirebbero una maggiore decelerazione. Quando quell'universo si fosse espanso cento volte, la densità in eccesso non sarebbe più dell'uno per cento ma del 100 per cento. Queste regioni più dense cessano allora di espandersi; si agglutinano formando galassie, ammassi e superammassi. L'universo si andrebbe espandendo intorno a loro, e le regioni meno dense diventerebbero "vuote".

Il risultato, ovviamente, dipende dai dettagli delle irregolarità iniziali – per esempio se la regione di cui si sta elaborando il modello contiene dieci regioni più dense ciascuna con dieci milioni di "particelle" o invece diecimila regioni più dense ciascuna contenente solo diecimila "particelle". La prima si evolverebbe creando un universo con dieci grandi strutture, la seconda con diecimila piccole galassie.[3]

Le fluttuazioni o "increspature" si sarebbero impresse nei primissimi stadi, quando l'universo non "sapeva" proprio nulla di galassie o di ammassi: non c'era in quell'epoca nulla di speciale nelle loro dimensioni (anzi, in nessuna di quelle dimensioni che ci sembrano oggi caratteristiche nel nostro universo). L'ipotesi più semplice sarebbe che non ci fosse nulla nell'universo primordiale che favorisse una scala piuttosto che un'altra, cosicché l'effetto gravitazionale delle fluttazioni risulterebbe lo stesso su ogni scala. All'inizio degli anni Settanta il cosmologo britannico Edward Harrison e Yakov

Zel'dovič hanno proposto argomenti di tipo generale a favore di queste fluttuazioni indipendenti dalla scala. Le teorie correnti sull'"universo inflazionario" (dichiaratamente di carattere ancora speculativo) suggeriscono che le fluttuazioni avessero effettivamente la forma di Harrison-Zel'dovič, o qualcosa di molto simile. Una prescrizione così semplice è coerente con la gamma di strutture complesse che sono emerse dieci miliardi di anni dopo? È per affrontare questa domanda che vengono progettate le simulazioni al calcolatore.

Una scatola di materia oscura "calda" o "fredda"?

Una parte tipica del nostro universo è come una scatola che si espande. All'inizio le condizioni sono quasi uniformi e la scatola è piccola e densa; la gravità rinforza i contrasti di densità fra piccole irregolarità iniziali, permettendo così alla struttura di svilupparsi con l'espandersi della scatola. Ipotesi naturali sulle fluttuazioni iniziali (e sulla materia oscura) potranno dar conto dell'emergere delle galassie, degli ammassi e dei superammassi quando l'universo arriva a un'età di dieci miliardi di anni? I "cosmologi sperimentali" usano i computer più veloci disponibili per far evolvere tutta una serie di "universi modello". I risultati vengono proiettati come se fossero un film: accelerando di un fattore 10^{15} l'intera evoluzione si svolge in pochi minuti. Il problema interessante, ovviamente, è quali condizioni iniziali portino a un universo simulato più simile a quello reale in cui ci troviamo.

Quando i dati sono pochi ha senso sottoporre a prova per prime le ipotesi più semplici e specifiche. Sarebbe da meravigliarsi se azzeccassimo l'idea giusta al primo colpo. Ma agli osservatori piace avere un "modello" con cui confrontare i dati che vanno raccogliendo (specialmente se riesce loro di confutarlo); e i teorici sviluppano un gusto per come le loro ipotesi potrebbero essere "reimpastate" per adattarsi meglio alle osservazioni.

In questo spirito, il mio lavoro di ricerca si è focalizzato su

un'ipotesi in particolare: che la materia gravitante che domina il nostro universo attuale, la materia oscura, consista di particelle sopravvissute alle prime fasi estremamente dense. Ciascuna di queste particelle potrebbe pesare circa quanto un atomo, ma esse interagirebbero così debolmente che ciascuna avvertirebbe solo l'effetto gravitazionale collettivo di tutte le altre e non colliderebbero mai l'una con l'altra. (Beh, diciamo quasi mai; gli sperimentatori che stanno cercando queste particelle nella nostra Galassia, le cercano tentando di registrare il contraccolpo che si verificherebbe quando, assai di rado, una di queste particelle colpisse un nucleo atomico: cfr. capitolo 6.) Queste particelle all'inizio sarebbero state dotate di piccoli movimenti casuali, come gli atomi di un gas a bassa temperatura. Questa ipotesi è poi stata chiamata lo scenario CDM (*Cold Dark Matter*, materia oscura *fredda*). Essa predice che la struttura cosmica si formi gerarchicamente: le scale subgalattiche si condenserebbero per prime; si fonderebbero poi in oggetti di massa galattica, che infine si ammasserebbero su scale più grandi.

Un'idea alternativa è che la materia oscura sia formata dai *neutrini*. Sulla loro esistenza non c'è nulla di ipotetico: sappiamo che esistono e possiamo calcolare quanti siano quelli sopravvissuti al Big Bang. I neutrini hanno masse piccole, o addirittura la loro massa è esattamente zero: questo non lo si sa ancora (vedi capitolo 6). I neutrini dell'universo primordiale avrebbero avuto velocità casuali molto elevate, come gli atomi di un gas caldo: di qui, senza troppa immaginazione, è venuta l'espressione HDM, cioè *Hot Dark Matter*, materia oscura *calda*. Le irregolarità su scale piccole vengono cancellate (a differenza dell'ipotesi CDM) perché i neutrini che si originano nelle regioni più dense e in quelle meno dense si muovono con una velocità sufficiente da cambiare posto, allisciando così qualsiasi fluttuazione iniziale più piccola di un superammasso. Le regioni molto grandi, dell'ordine dei superammassi, sarebbero le prime a formarsi; e si frammenterebbero poi in sistemi di massa galattica. In altre parole, le strutture dello scenario HDM si formerebbero dall'alto verso il basso

[*top down*], mentre nel caso CDM emergerebbero gerarchicamente in senso opposto [*bottom up*].

Gli universi simulati al calcolatore finiscono con l'apparire molto differenti nei due scenari. Se uno dei due assomigliasse al nostro universo reale molto più da vicino dell'altro, questo sarebbe un forte indizio sulla vera natura della materia oscura. Ma il confronto non è così semplice da fare. Queste simulazioni predicono in modo affidabile l'attuale configurazione della condensazione della *materia oscura*: neutrini in un caso (HDM), particelle esotiche nell'altro (CDM). Ma abbiamo solo indizi indiretti su come la materia *oscura* sia effettivamente distribuita nel nostro universo. Ne sappiamo molto di più, ovviamente, sulla materia *luminosa* – quella, cioè, fatta da atomi ordinari – ma queste nostre conoscenze potrebbero anche essere fuorvianti: le galassie, per esempio, potrebbero trovarsi di preferenza nei luoghi dove è più alta la concentrazione di materia oscura, proprio come le creste bianche di spuma segnalano le onde più alte nell'oceano.

Indizi a favore della materia oscura "fredda"

Le figure che le galassie disegnano nel cielo assomigliano un po' a un intrico di filamenti. Ma il nostro occhio è anche troppo bravo a cogliere caratteristiche di questo tipo, anche quando non sono significative. (Per i nostri antenati era molto meglio "vedere" delle tigri anche dove non ce n'erano che non vederne una quando c'era per davvero.) Gli astronomi reagiscono alle figure celesti un po' come alle macchie d'inchiostro del test di Rorschach. Hanno bisogno dell'aiuto degli statistici per descrivere le condensazioni da un punto di vista quantitativo. Ma dagli studi fatti fin qui sembra già che una simulazione dominata dai neutrini (HDM) produrrebbe strutture chiaramente meno interessanti di quelle della CDM, e che avrebbero meno somiglianza con la configurazione reale delle galassie.

Una simulazione che assomigli veramente al nostro universo reale deve riprodurre la struttura che si osserva nell'epoca

presente. Ma deve far anche di più: deve accordarsi con i dati riguardanti tutte le epoche passate che possiamo ottenere studiando oggetti dotati di un forte spostamento verso il rosso. Gli ammassi di galassie con uno spostamento verso il rosso molto accentuato (come dire: gli ammassi di galassie nel passato) sono meno cospicui. Il che concorda bene con le simulazioni basate sulla CDM, per le quali la formazione dei grandi ammassi avviene solo in epoche più tarde, attraverso la fusione di ammassi più piccoli.

Le galassie (o quanto meno i loro aloni esterni) si sfiorerebbero l'un l'altra se lo spazio fra di esse fosse cinque volte più piccolo. Cosa che suggerisce che le protogalassie abbiano cessato di espandersi e si siano separate in quello stadio dell'espansione corrispondente a un'età dell'universo di circa un miliardo di anni.

La ricerca di oggetti con spostamenti verso il rosso sempre più notevoli non è motivata solo dal gusto di battere il record: se si riuscisse a scoprire delle galassie pienamente formate in epoche molto precoci della storia cosmica, i teorici si troverebbero con le spalle al muro. Anche nel modello basato sulla CDM sarebbe trascorso un periodo di circa un miliardo di anni prima che si formassero le galassie. La teoria rivale HDM – che postula che la materia oscura consista di neutrini dotati di una massa molto piccola – predice che le galassie si sarebbero formate più tardi rispetto alla teoria CDM e si trova già di fronte a problemi considerevoli.

Telescopi più grandi non riveleranno necessariamente galassie ancora più lontane di quelle già scoperte (anche se ci daranno, ovviamente, immagini più chiare di quelle che sono già state trovate). Se avessimo già scoperto le prime galassie che si sono formate, l'osservazione verso zone ancora più remote (e più lontane nel passato) sonderebbe solo i secoli bui di un'era pregalattica priva di configurazioni caratteristiche.

Ma c'è tuttora controversia sull'idea che una qualunque ipotesi semplice sulla natura della materia oscura (neutrini? particelle fredde? un miscuglio dei due?) riesca a dar conto dell'intera gamma di strutture del nostro universo attuale.

Le strutture più grandi: un nuovo numero cosmico

I superammassi sono solo poche volte più densi di un volume medio di spazio; stanno ancora condensandosi nell'universo in espansione. D'altro canto, sistemi di scala più piccola – le singole galassie e piccoli gruppi di galassie – sono molto più compatti, avendo raggiunto un equilibrio molto tempo fa: c'è stato abbastanza tempo perché una complicata evoluzione interna cancellasse ogni traccia evidente di come si sono formati. Le strutture cosmiche più grandi conservano l'impronta più diretta della loro formazione, e hanno dunque un riferimento più immediato alle domande riguardanti l'universo primordiale.

Da un punto di vista gravitazionale, persino i più grandi superammassi rappresentano solo lievi irregolarità in un universo fondamentalmente liscio e uniforme. C'è un modo naturale di caratterizzare con quanta intensità la gravità leghi insieme una struttura cosmica: possiamo chiederci quale frazione della sua "energia della massa a riposo" (mc^2) totale occorrerebbe per farla a pezzi. Per gli ammassi e i superammassi la risposta è che ne occorrerebbe circa un centomillesimo, 10^{-5}.

Siccome questo importante numero è così piccolo, la gravità è in effetti molto debole nelle galassie e negli ammassi. La teoria newtoniana è pienamente adeguata per analizzare come si formino queste strutture e come evolvano i loro moti interni; il che semplifica grandemente le simulazioni al calcolatore. La piccolezza di questo numero significa pure che possiamo validamente trattare il nostro universo come se fosse omogeneo, proprio come possiamo considerare un globo liscio e rotondo se l'altezza delle onde e delle increspature sulla sua superficie non supera 1/100.000 del suo raggio. Questo numero non cambia col tempo: era quindi lo stesso anche per ogni regione dell'universo primordiale leggermente più densa della media, ed è sempre lo stesso per gli ammassi (o i superammassi) in cui queste regioni si sono poi evolute. Esso caratterizza la "rugosità" dell'universo primordiale: lo chiameremo Q.[4]

Increspature nella radiazione di fondo

Osserviamo quasar e galassie così lontani che la loro luce è scaturita quando l'universo aveva appena un decimo della sua età attuale. L'astronomia tradizionale non potrà mai, però, sondare ancora più lontano dell'era in cui questi oggetti si formarono per la prima volta e l'universo si "accese". Ma, se avessimo ragione nel ritenere che le strutture cosmiche sono emerse grazie a instabilità gravitazionali, allora i loro precursori devono essere esistiti anche in precedenza, sotto forma di regioni con una densità superiore alla media, e che si espandevano a una velocità leggermente inferiore alla media. Questi precursori avrebbero dovuto lasciare tracce nella radiazione di fondo a microonde, che è a sua volta un relitto dell'universo primordiale.

Il nostro universo sarebbe iniziato in uno stato denso e opaco, simile a quello del gas che brilla dentro una stella. I quanti di radiazione (fotoni) sarebbero stati ripetutamente deviati e diffusi dagli elettroni. Ma dopo circa un milione di anni di espansione la temperatura sarebbe scesa a 3000 gradi – un po' più fredda di quella della superficie del Sole. Gli elettroni si sarebbero mossi abbastanza lentamente da poter essere catturati dai protoni, formando atomi di idrogeno. Non avrebbero più diffuso i fotoni, e l'universo sarebbe così diventato trasparente. La nebbia primeva si sarebbe alzata e i fotoni, da allora in poi, hanno potuto viaggiare ininterrottamente fino ai tempi presenti.

La radiazione di fondo a microonde che arriva ai nostri radiotelescopi proviene in effetti da un'"ultima superficie di diffusione" [*last scattering surface*], assai più lontana dei più lontani quasar, e ci reca informazioni su un'era molto più antica di quella in cui si formarono i quasar o le galassie.

Questa superficie – detta anche "fotosfera cosmica", per analogia con la superficie del Sole, che si chiama per l'appunto fotosfera – si trova a un livello di spostamento verso il rosso pari a 1000, dato che l'universo si è espanso appunto di un fattore 1000, e di altrettanto si è allungata la lunghezza d'onda

delle radiazioni, nel raffreddarsi da 3000 gradi alla temperatura attuale, appena 3 gradi sopra lo zero assoluto.

Un ammasso in via di formazione proprio ai confini della fotosfera cosmica avrebbe emesso una radiazione che ci arriverebbe leggermente più fredda di quella delle altre parti della superficie. Essa, infatti, avrebbe perso energia (e subìto quindi un ulteriore, per quanto lieve, spostamento verso il rosso) nello sfuggire alla maggiore gravità di una regione un po' più densa della media. La diminuzione di temperatura dovrebbe essere solo di circa un centomillesimo: quel piccolo *Q* di cui abbiamo parlato prima e che misura quanto sia irregolare l'universo. Si tratta di un obiettivo ambizioso da raggiungere per sperimentatori qui sulla Terra: la radiazione cosmica *totale*, appena al di sotto dei tre gradi Kelvin, è solo l'uno per cento circa dell'emissione della Terra (la cui temperatura superficiale è all'incirca 300 gradi Kelvin) e l'effetto che si vorrebbe trovare è 100.000 volte più piccolo.

Verso il 1980 gli esperimenti al suolo erano diventati abbastanza sensibili da rilevare differenze di temperatura nelle varie zone del cielo anche di una parte su diecimila. Ma non si era trovato nulla se non totale uniformità. Un progetto sovietico, il RELICT, per evitare gli effetti dell'atmosfera, mise in orbita un satellite che scandiva l'intero cielo con una sensibilità un po' migliore, ma anch'esso non rilevò nessuna deviazione dall'uniformità. I sovietici furono sfortunati, perché, come si scoprì poi, sarebbe bastato solo un modesto miglioramento per trasformare questo "limite superiore" in risultati positivi.

COBE *e dopo*

Il satellite *Cosmic Background Explorer* (COBE) della NASA fu progettato per misurare differenze di temperatura più piccole di un centomillesimo e riuscì nell'impresa. Rilevare questo debole segno di un'irregolarità nel campo gravitazionale dell'universo primitivo fu un vero trionfo della tecnica: si tratta di una scoperta rilevante, una delle più grandi, anche se i ri-

sultati non erano inattesi. Sarebbe stato assai più sorprendente (anzi, ne saremmo rimasti tutti sconcertati) se *non si fosse riusciti* a rilevare le fluttuazioni al livello di sensibilità del COBE. Un universo primordiale ancora più liscio sarebbe sembrato incompatibile con i cospicui ammassi e superammassi che vediamo oggi intorno a noi: i contrasti di densità avrebbero dovuto svilupparsi più velocemente di quanto non facciano sotto l'azione della gravità e i teorici sarebbero stati costretti a invocare un qualche meccanismo non gravitazionale, ma di altro genere.

Il giorno dopo l'annuncio della scoperta, nell'aprile 1992, rimasi stupito, aprendo il mio quotidiano inglese, di trovare un titolo a nove colonne che annunciava a caratteri cubitali COME INIZIÒ L'UNIVERSO, seguito da una dettagliata descrizione di che cosa ciò significasse. Gli sperimentatori avevano indetto una conferenza stampa e prodotto una campagna di pubblicazioni in cui ricercatori sponsorizzati dalla NASA annunciavano con squilli di tromba ed espressioni stravaganti la scoperta del "Santo Graal [...] la visione del volto di Dio", e simili. Persino Stephen Hawking (che non dipende da finanziamenti NASA) stimava che i risultati fossero "la più grande scoperta di questo secolo, se non di tutti i tempi".

Quando l'attenzione dei media raggiunge una certa soglia, si autoalimenta e si amplifica. Non era la prima volta che scoperte scientifiche venivano esagerate e distorte nei titoli dei giornali. Lo stesso Einstein ne era rimasto vittima. Ma nel caso del COBE furono *i ricercatori stessi* a dare il via alle danze: i media si limitarono a riportare ciò che dicevano gli "esperti" accettandolo così com'era. Disgraziatamente, ci sono dei casi in cui i giornalisti dovrebbero accertarsi delle dichiarazioni degli scienziati con quello scetticismo che usualmente dedicano alle affermazioni dei politici.

È raro che la scienza faccia notizia. Gli scienziati non se ne possono ragionevolmente lamentare, non più di quanto i romanzieri o i compositori si lamentino del fatto che le loro ultime produzioni non riempiano i titoli di testa dei giornali. Le idee e le scoperte nuove e importanti spesso si fanno strada

gradualmente, grazie agli sforzi collettivi di molte persone. La scienza viene trattata giornalisticamente solo nella misura in cui si può restringere a titoli che fanno notizia: risultati annunciati di fresco che abbiano un messaggio frizzante e facilmente riassumibile. Metodica questa che non può evitare di trasmettere impressioni distorte. E questo giudizio resterebbe vero anche se i risultati che finiscono in prima pagina fossero scelti in modo ottimale; di fatto, la distorsione è persino maggiore perché alcuni scienziati (e alcune istituzioni) sono assai più efficaci di altri nel comunicare e propagandare le loro ricerche.

Ricostruire il quadro complessivo

Il satellite COBE continuò a raccogliere dati per quattro anni, e a tracciare una mappa della temperatura di fondo del cielo intero. Il suo angolo di apertura era di sette gradi, cosicché la finezza dei dettagli risultava un po' confusa. Nondimeno, riuscì a trovare irregolarità su tutte le misure angolari comprese fra sette e novanta gradi. Le fluttuazioni di temperatura erano all'incirca le stesse in tutto questo intervallo, il che significa che l'universo non è mai diventato più "rugoso" o più "liscio" col crescere delle sue dimensioni. L'entusiasmo di Stephen Hawking era così sfrenato perché alcune idee molto promettenti (quelle di un universo "inflazionario", di cui parleremo nel capitolo 10) predicono che le fluttuazioni siano state impresse nel nostro universo quando aveva un'età inferiore ai 10^{-36} secondi. Hawking credeva che COBE ci stesse raccontando la "nascita quantistica" del nostro universo.

Qualche centinaio di milioni di anni luce: è questo il diametro dei superammassi di galassie più grandi: si tratta di dimensioni grandi, vaste, ma sempre cento volte più piccole del nostro universo osservabile. Se il precursore di una tale struttura si estendeva sulla fotosfera cosmica, avrebbe sotteso un angolo di appena un grado. COBE, dunque, aveva sondato scale ancora più grandi di quelle dei superammassi di galassie. Le regioni più dense della media su queste scale enormi non si sono anco-

ra condensate in misura discernibile perché la loro energia gravitazionale supplementare (solo 10^{-5} volte l'energia della loro massa a riposo) non può competere con l'energia cinetica dell'espansione che è più importante per sistemi di grande scala.

Strumenti installati sulla cima di montagne, in palloni sonda e al Polo Sud hanno scoperto fluttuazioni di temperatura su scale angolari di meno di un grado. Questi esperimenti non possono procurarci una mappa dell'intero cielo, come può invece fare un satellite, ma possono raggiungere la stessa sensibilità con costi enormemente minori. All'inizio del prossimo millennio, tuttavia, due nuovi esperimenti spaziali – uno sostenuto dalla NASA, l'altro dall'Agenzia Spaziale Europea – produrranno una mappa delle fluttuazioni nel cielo intero, di grandissimo dettaglio; questi esperimenti dovrebbero controllare quale sia quella corretta (ammesso che una ce ne sia) delle nostre idee correnti sulla formazione delle galassie.

L'universo primordiale era liscio, nel senso in cui possiamo dire che lo è l'oceano. C'è una curvatura media ben definita, ma ci sono anche onde e increspature. Se scrutate un oceano dall'aeroplano, all'inizio non vedrete altro che una liscia distesa, salvo il fatto che si incurva dolcemente seguendo la curvatura della Terra. Ma se la vostra visione si fa più acuta potrete cominciare a discernere alcune onde. E un altro piccolo miglioramento vi permetterà di studiare le onde in dettaglio: qual è la distribuzione statistica delle onde? Le onde più lunghe sono più alte di quelle corte? È questa una metafora dell'eccitante potenziale che hanno gli studi sulla radiazione di fondo a microonde. Il COBE ha ottenuto un primo risultato positivo; questo è stato poi corroborato ed esteso; si stanno oggi costruendo nuovi strumenti dieci volte più sensibili di quelli di cui attualmente disponiamo.

La fabbrica di altri universi

La forma della struttura che emerge dall'universo primordiale dipende da una nuova costante fondamentale: il numero

che misura la rugosità dell'universo ai suoi inizi, l'"altezza" delle increspature createsi sulla sua levigatezza globale. Questo numero *Q*, nel nostro universo, vale circa 10^{-5}. *Q* ci dice quale fosse l'energia delle fluttuazioni, in termini di percentuali dell'energia totale del nostro universo. Esso determina quali strutture si condensano, e la scala dei superammassi più grandi. Siccome *Q* è piccolo, la radiazione di fondo è molto uniforme nel cielo, e la semplice idealizzazione matematica per cui il nostro universo sarebbe, globalmente, del tutto uniforme, è un'approssimazione abbastanza buona da risultare utile.

Cosa sarebbe successo in un universo in cui *Q* fosse molto diverso, ma, per altro verso, la fisica rimanesse la stessa del nostro? Questa è un'altra di quelle domande cui, grazie all'aiuto dei computer, possiamo tentare di dare una risposta. In un universo molto più liscio (in cui *Q* fosse molto più piccolo di 10^{-5}) le galassie non si sarebbero mai condensate; le nubi di gas non si sarebbero mai raffreddate e frammentate in stelle. Un tale universo rimarrebbe buio, pervaso da idrogeno ed elio sempre più diffusi e diluiti, anche se si continuasse a espandere per un tempo assai maggiore di 10 miliardi di anni.

Più difficile è calcolare il corso dell'evoluzione cosmica in un universo più rugoso del nostro, in cui *Q* fosse molto più grande di 10^{-5}. La cosmologia sarebbe certamente un campo molto più confuso. Tutta una gerarchia di strutture grandiose si estenderebbe fino a scale molto più grandi di quella dei superammassi del nostro universo reale; un "buon campione" dell'universo richiederebbe l'osservazione e i relativi calcoli di media su un volume corrispondentemente più grande. Ma che in un tale universo possano evolversi degli osservatori (o stelle, addirittura) è tutt'altro che ovvio. Violente onde d'urto squasserebbero lo spazio intero con intensi raggi X e raggi gamma. Si condenserebbero enormi nubi di gas, molto prima di quanto non abbiano fatto le protogalassie nel nostro universo, e molto più pesanti e dense – così tanto più dense che potrebbero anche rapidamente collassare in grandi buchi neri invece di trasformarsi in quel tipo di aggregato stellare che

noi chiamiamo galassia. E le stelle che riuscissero a formarsi sarebbero così vicine l'un l'altra e si muoverebbero così velocemente da rendere frequenti gli incontri ravvicinati. E anche se si riuscissero a formare dei pianeti intorno alle stelle, le orbite planetarie non rimarrebbero stabili per un tempo sufficiente da permettere alla vita di evolversi.

Progressi e prospettive

Si usava un tempo deridere la cosmologia perché sarebbe stata una scienza in cui i fatti erano così scarsi che la teoria poteva spaziare senza limiti. Sicuramente, le cose oggi non stanno più così: anzi, più che nella mancanza di fatti, la sfida consiste ora nel riconciliare tutti i dati in un solo schema teorico.[5]

La radiazione di fondo a microonde sonda direttamente l'era che precedette la formazione delle galassie. Il suo studio completa ciò che gli astronomi hanno imparato dalla "cartografia", sempre più accurata, del nostro ambiente cosmico attuale, e dalla scoperta di quasar e di galassie così lontane che la loro luce fu emessa quando si erano appena formate. La sfida consiste nel dare un senso a tutta questa ragnatela di fatti e di indizi, e nel riuscire a inferirne il corso dell'evoluzione cosmica.

Quando penso a come si formarono le galassie o a come spiegare il rompicapo dei quasar, le mie modalità di riflessione non differiscono in modo essenziale da quelle di un tecnico che cerchi di progettare un modello che risponda a date caratteristiche, o di un avvocato che cerchi di costruire la sua arringa valutando le prove emerse nel dibattimento. Ciò che distingue i fenomeni cosmologici è la loro estrema lontananza nel tempo e nello spazio, e l'estrema differenza di scala, tale da impedirci di estrapolare fidandoci delle intuizioni del senso comune.

I cosmologi, esattamente come gli uomini di legge, credono che ci sia una verità da trovare. Questo tratto distintivo viene spesso oscurato negli scritti dei sociologi che trattano i

"sistemi di credenze scientifiche" come costrutti sociali che potrebbero anche rappresentare un mito transeunte. Il consenso fra gli scienziati non dovrebbe essere valutato solo in sé e per sé, specie quando si tratti di un consenso crescente: conta piuttosto se esso indichi una genuina crescita della comprensione e della conoscenza.

La sociologia e lo studio delle "politiche" scientifiche rappresentano un campo affascinante. Lo stile della nostra ricerca e l'accento che viene messo ora su quello ora su quell'altro argomento sono modellati non solo dalle singole personalità, ma dal clima sociale e culturale, nonché da fattori politici anche più ampi. La disponibilità (almeno fino a poco tempo fa) con cui i governi hanno fornito enormi somme per la costruzione di acceleratori di particelle dipendeva in gran parte dal prestigio che i fisici avevano acquisito giocando il ruolo chiave che ebbero nel corso della Seconda Guerra Mondiale. La ricerca cosmologica è stata molto influenzata (a volte quasi distorta) dall'impulso dato ai progetti spaziali, che a loro volta erano influenzati dalla rivalità fra le due superpotenze; come pure da incursioni di scienziati provenienti da esperienze e stili di ricerca diversi. Più di ogni altra cosa il nostro lavoro è stato influenzato dalle opportunità – e dalle limitazioni – offerte dalle tecniche disponibili: sperimentali, di osservazione e computazionali. Queste influenze rappresentano da sole, e a buon diritto, un campo di studio affascinante. Questi studi non dovrebbero però oscurare ciò che a noi, che stiamo nelle gabbie dello zoo, sembra l'essenza della scienza: un'impresa collettiva e cumulativa che, con tutte le sue irregolarità, riesce a gettare sulle opere della natura una luce più chiara e più "vera".

Steven Weinberg ha delineato una bella analogia per la concezione "realista" dei *contenuti* della ricerca scientifica: "Un gruppo di alpinisti può discutere a lungo su quale sia il sentiero migliore per raggiungere la vetta e i loro argomenti possono essere condizionati dalla storia e dalla struttura sociale della spedizione. Ma in fin dei conti il sentiero per scala-

re la montagna o lo trovano o non lo trovano. E quando arrivano in cima, sanno di esserci arrivati".[6]

Può essere che i cosmologi stiano ancora brancolando, giù sulle prime colline. Ma hanno fatto progressi molto notevoli. I precursori embrionali delle galassie e delle strutture cosmiche più grandi non sono più solo entità ipotetiche: le possiamo effettivamente osservare. La fabbrica della struttura cosmica dipende solo da alcuni numeri. Una qualunque scelta di questi numeri definisce un universo: dandoli in pasto ai nostri computer sotto forma di "condizioni iniziali" possiamo calcolare quali cambiamenti introdurrebbe la gravità (e le altre forze) nel corso dell'espansione. Solo una piccola parte di questi universi possibili condurrebbe alla formazione di stelle e galassie (le complessità interne alle galassie sorpassano poi la potenza di calcolo di un qualsiasi computer). Entro questa piccola parte cerchiamo poi quale sia quell'universo che si adatta meglio, in senso statistico, al nostro universo reale. Col migliorare delle capacità di calcolo, le somiglianze si fanno sempre più fedeli e realistiche.

NOTE

1. Uno dei miglioramenti più notevoli si è verificato quando le lastre fotografiche sono state sostituite da nuovi tipi di rivelatori di luce, noti come rivelatori ad accoppiamento di carica o CCD (*charge-coupled devices*). Una lastra fotografica ha un'efficienza quantistica di poco superiore all'uno per cento: solo un quanto di luce (un fotone) su cento viene effettivamente registrato dall'emulsione fotografica. L'efficienza dei CCD sale invece all'ottanta per cento. E questa non è la sola ragione per cui i telescopi al suolo sono oggi di gran lunga più efficienti. Non è più necessario registrare gli spettri uno alla volta: le fibre ottiche permettono oggi di studiare simultaneamente varie centinaia di oggetti presenti nel campo visivo. Ora che solo il 20 per cento dei fotoni che colpiscono lo specchio vanno sprecati, non ha più molto senso cercare di migliorare l'efficienza dei telescopi già esistenti: di qui la ripresa della costruzione di nuovi telescopi nel corso degli anni Novanta.

2. Un secondo vantaggio degli specchi più grandi è che essi forniscono immagini più precise. Tuttavia, anche se la qualità dello specchio fosse perfetta, le turbolenze atmosferiche renderebbero le immagini confuse, specie per quanto riguarda la luce azzurro-blu. A lungo termine gli astronomi sperano di poter monitorare lo "scintillio" atmosferico e correggerlo istantaneamente. I militari americani hanno esplorato tecniche del genere nell'ambito del programma "*Star Wars*" (il programma delle "Guerre stellari", noto anche come SDI); successivamente i loro lavori sono stati declassificati e resi disponibili.

3. Nell'universo reale possono entrare in gioco anche altre forze, oltre alla gravità. Una galassia si forma dal collasso di una regione che si estende per centinaia di migliaia di anni luce. Il gas che la costituisce irraggia e disperde il calore liberato dalla contrazione; il gas si stabilizza in un disco e si frammenta in milioni di piccole nubi, ciascuna delle quali è però abbastanza grande da poter essere l'utero da cui nasceranno le stelle. Si inizia così il processo di riciclaggio che sintetizza e disperde gli elementi del sistema periodico.

4. La rugosità dell'universo primordiale (l'altezza delle increspature) potrebbe in linea di principio dipendere dalla scala. Tuttavia, Q, per le fluttuazioni di Harrison-Zel'dovič, è lo stesso su tutte le scale, e ha un significato più fondamentale.

5. Il valore di Q che viene inferito dai dati di COBE si accorda con quello stimato sulla base dello studio dei superammassi, "Grandi Muraglie" e simili. Le estrapolazioni possibili sulla scala degli ammassi, fino a quella delle singole galassie dipendono da che cosa sia costituita la materia oscura. I dati per le scale più piccole sono interamente coerenti con la teoria CDM, ma solo se il valore di Q fosse pari a circa la metà di quello ricavato dalle osservazioni dei superammassi e dai dati COBE. Ci sono varie possibilità di "stiracchiare" la teoria CDM standard in modo da risolvere questa discrepanza fra scale grandi e scale più piccole. Le fluttuazioni iniziali potrebbero, per esempio, crescere con la scala, e Q potrebbe anche non essere un numero universale. L'accordo con i dati potrebbe venir migliorato, anche se il neutrino avesse una massa sufficiente da contribuire per un venti per cento alla materia oscura (il resto della quale sarebbe invece "fredda"). Siccome si sarebbero mossi a gran velocità nell'universo primordiale, i neutrini avrebbero teso a smorzare e a sopprimere le fluttuazioni su piccola scala, ma a rinforzare quelle su scala grande, troppo grande perché lo smorzamento potesse essere efficace. Se si potesse ottenere una prova sperimentale indipendente che la massa del neutrino si trova in un intervallo appropriato, molti cosmologi sposerebbero con entusiasmo questa ipotesi "ibrida" sulla materia oscura. L'accordo con i dati migliorerebbe anche se ci fosse meno materia oscura di quella necessaria per produrre la densità "critica" – quella cioè richiesta (vedi capitolo 8) perché l'espansione universale finisca coll'arrestarsi.

6. La citazione è dal libro di Weinberg *Dream of a Final Theory*, Hutchinson, London 1993 (tr. it. *Il sogno dell'unità dell'universo*, Mondadori, Milano 1993).

8
OMEGA E LAMBDA

La volpe sa molte cose, ma l'istrice ne sa una grande.

ARCHILOCO

Qual è la densità media?

Siamo riusciti a inferire alcune cose sui densi e caldi inizi del nostro universo e su come ne emersero le galassie e le stelle. Ma che sappiamo del futuro lontano? Tutto tornerà a collassare? I nostri remoti discendenti condivideranno tutti il destino dell'astronauta che si avventurasse in un buco nero? O l'espansione continuerà per sempre?

Se la gravità fosse abbastanza forte, il nostro universo finirebbe col cessare di espandersi e comincerebbe a contrarsi. Immaginatevi una grossa sfera, per esempio un asteroide, schiantata da un'esplosione, i cui frammenti volano via in tutte le direzioni. Ogni frammento è sottoposto all'attrazione gravitazionale di tutti gli altri, e ciò decelererebbe l'espansione. Se l'esplosione iniziale fosse stata sufficientemente violenta, i frammenti continuerebbero a volare via, allontanandosi per sempre; ma se i frammenti non si muovessero troppo velocemente, la gravità potrebbe legarli l'un l'altro con abbastanza forza da arrestare l'espansione. Il materiale collasserebbe poi ritornando, per così dire, allo stato iniziale.[1]

Le galassie sono come "frammenti" del nostro universo in

espansione. Sappiamo con quale velocità se ne volano via, allontanandosi fra loro essenzialmente secondo la legge di Hubble; meno certo è, però, quale sia la massa totale (o la densità media) di tutta la materia che, con la sua attrazione gravitazionale, imbriglia l'espansione.

È facile calcolare che il nostro universo finirà col fermarsi e collassare nuovamente se la densità cosmica supera un valore (detto "densità critica") di circa *cinque* atomi per metro cubo di spazio; in caso contrario l'espansione continuerà per sempre. Cinque atomi per metro cubo è una densità fantasticamente piccola: molto più vicina al vuoto perfetto di quanto potremmo mai realizzare qui sulla Terra; milioni di volte inferiore a quella delle nubi di gas interstellare della nostra Via Lattea. Ma il nostro universo reale potrebbe essere ancora più vuoto di così: se tutte le stelle e le galassie venissero smantellate, e gli atomi di cui sono fatte venissero distribuiti uniformemente nello spazio, otterremmo soltanto una densità di *un decimo di atomo* per metro cubo: un vuoto davvero fantastico, l'equivalente di un fiocco di neve distribuito nell'intero volume della Terra. È un cinquantesimo circa di ciò che servirebbe per arrestare l'espansione universale. Il rapporto fra la densità reale e la densità critica viene normalmente indicato con la lettera greca omega (Ω).[2]

Quanto vale dunque omega? Può arrivare al valore 1? Non siamo ancora in grado di rispondere a questa domanda. Sappiamo però che è certamente più grande di 1/50: abbiamo visto nel capitolo 6 che la materia oscura sorpassa in peso quella luminosa di almeno dieci volte. Che sia fatta di nane brune, di particelle esotiche o di buchi neri, la sua gravità domina il materiale "visibile" delle galassie. Con tutto ciò, questa materia oscura di cui possiamo affidabilmente inferire l'esistenza porta la densità solo a circa un quinto della densità critica, il che darebbe un valore di omega pari a circa 0,2.

La materia oscura con cui siamo abituati a trattare si trova o negli strati esterni delle singole galassie o negli ammassi di galassie (probabilmente è stata sloggiata dalle galassie cui apparteneva negli "incontri ravvicinati" che si verificano all'in-

terno di un ammasso). Non potrebbe, però, essercene dell'altra, sparsa negli enormi superammassi, o addirittura diffusa sino a pervadere l'intero spazio intergalattico? Se così fosse, essa non influenzerebbe i moti interni alle galassie, e nemmeno i moti delle galassie all'interno di un ammasso. Ma rallenterebbe l'espansione cosmica complessiva; sino al punto, forse, di portarla un giorno ad arrestarsi completamente.

I cosmologi inclinano a coltivare fortemente il pregiudizio che – per ragioni che spiegheremo in seguito – il nostro universo contenga la densità critica per intero; il che fornisce un ulteriore motivo per cercare la materia oscura che ci vuole per colmare il ponte fra $\Omega = 0{,}2$ e $\Omega = 1$.

Grandi attrattori

Gli ammassi e i superammassi molto distanti sono diffusi nel cielo più o meno uniformemente; ed essendocene un ugual numero in ogni direzione le loro forze gravitazionali sulla nostra Galassia si cancellano a vicenda. Ma la topografia della regione intorno a noi compresa in un raggio di qualche centinaio di milioni di anni luce, ora che è stata rilevata in dettaglio, si presenta molto meno uniforme. Il superammasso della Vergine e quello dell'Idra-Centauro non sono equilibrati da strutture altrettanto prominenti situate nella direzione opposta: la nostra Galassia deve dunque essere soggetta a un'attrazione gravitazionale che la dovrebbe spingere verso di loro. L'intensità di questa attrazione dipende da quanta materia oscura è associata a questi superammassi, il che è direttamente collegato al valore di omega.

Possiamo misurare il moto della nostra Galassia? In pratica, il miglior sistema di riferimento è costituito dalla radiazione di fondo a microonde, la cui sorgente effettiva (la fotosfera cosmica o ultima superficie di diffusione, di cui abbiamo parlato nel capitolo 7) si trova al di là delle galassie più lontane e che quindi rappresenta una media sul volume assolutamente più grande che possiamo osservare. Se noi ci muoviamo in

mezzo a questa radiazione, essa deve sembrare più calda nella direzione del moto e più fredda in quella opposta. Solo se fossimo perfettamente in quiete rispetto alla media di tutta la materia molto distante, la temperatura sarebbe esattamente la stessa in tutte le direzioni intorno a noi.[3] (Questo "sistema di riferimento preferenziale" è del tutto compatibile con la relatività einsteiniana; questa teoria dice che la fisica locale all'interno di tutte le astronavi deve essere identica, non che se ci affacciamo a un oblò dovremo vedere sempre la stessa cosa, indipendentemente dall'astronave.)

"Eppur, si muove", avrebbe detto Galileo riconfermando a se stesso, nonostante l'abiura impostagli dalla Chiesa, la sua fede nel moto della Terra intorno al Sole. È ormai dagli anni Venti che sappiamo che il Sole stesso si muove, orbitando intorno al centro della Galassia. Ma la Galassia intera si muove anche lei? Più di vent'anni fa, George Smoot e i suoi collaboratori cercarono un segno di questo moto nella radiazione di fondo. Non avevano accesso allo spazio (il satellite COBE è venuto molto più tardi) e sistemarono i loro strumenti su un aereo U2 capace di volare a grandi altezze. Scoprirono che la nostra Galassia si sta muovendo a 600 chilometri al secondo. Siamo attratti dall'Ammasso della Vergine. Ma a sua volta l'intero Ammasso della Vergine è attratto verso ammassi ancora più lontani e viene "spinto" ad allontanarsi dai vuoti. Persino a una distanza di 300 milioni di anni luce (una distanza cinque volte superiore a quella che ci separa dall'Ammasso della Vergine) le galassie non sono distribuite nel cielo uniformemente, e veniamo spinti nella direzione in cui la concentrazione è più elevata.

Il nostro moto relativo al "sistema di riferimento" medio si mostra nella radiazione di fondo. Ma scoprire moti analoghi in altre galassie è più problematico. Il libro di Alan Dressler *Voyage to the Great Attractor* (*Viaggio verso il Grande Attrattore*) descrive come Dressler e sei suoi colleghi (diventati poi noti fra gli altri astronomi come i "sette samurai") scoprirono che varie centinaia di galassie, compresa la nostra, vengono attratte in modo coordinato da una qualche enorme concentrazione di massa. Che cosa esattamente sia e dove esattamente si trovi questa massa è ancora controverso, ma il nome che Dressler le diede, il Grande Attrattore, è rimasto. È uno di quei tanti casi in cui un nome orecchiabile e ben azzeccato viene inventato prima ancora che la cosa che denota sia completamente compresa.[4]

Velocità di molte centinaia di chilometri al secondo sembrano essere piuttosto comuni: il moto della nostra Galassia non è né particolarmente veloce né particolarmente lento. Inoltre, i moti sono coordinati su scale sorprendentemente grandi (una specie di corrispettivo cosmico della tettonica a placche qui sulla Terra), cosicché devono essere indotti da qualche concentrazione di massa non vista di dimensioni enormi.

Questi pretesi moti su larga scala richiedono che omega abbia un valore maggiore di 0,2; sembra addirittura che potrebbero adattarsi a un valore di omega uguale a 1. Potrebbe dunque esistere anche altra materia oscura, nei superammassi e nei "grandi attrattori" diffusi in tutto l'universo.

La decelerazione cosmica

Quanta più materia oscura c'è, tanto più dovrebbe rallentare l'espansione cosmica. Questa *decelerazione* si dovrebbe manifestare quando gli astronomi misurano lo spostamento verso il rosso (ovvero la velocità di recessione) di galassie molto lontane. Tali misurazioni ci dicono a quale velocità quelle galassie recedevano nel *passato lontano*, quando fu emessa la luce che arriva oggi sino a noi.

La semplice legge di Hubble, per cui lo spostamento verso il rosso è proporzionale alla distanza, non può essere estesa senza ambiguità a distanze molto grandi (e quindi a spostamenti verso il rosso molto grandi). Quando si paragonano in un grafico la luminosità e gli spostamenti verso il rosso di oggetti lontanissimi, la forma del grafico dipende da quanta decelerazione (o accelerazione) c'è stata. Allan Sandage dell'Os-

servatorio di Monte Palomar fu l'astronomo che si diede più da fare per sviluppare i programmi di ricerca che Hubble aveva avviato. Con il suo telescopio da duecento pollici fu il primo a tentare seriamente di misurare la decelerazione cosmica.

Il metodo di Sandage, semplicissimo in linea di principio, fu diabolicamente tormentato da frustranti incertezze e indeterminazioni; nonostante decenni di fatiche, non ha ancora prodotto una risposta affidabile. La velocità di espansione, è ovvio, cambia solo molto lentamente; per discernere un qualsiasi cambiamento si devono osservare galassie la cui luce è stata emessa vari miliardi di anni fa. Galassie di questo genere appaiono molto deboli, anche quando vengono osservate con i telescopi più grandi. Inoltre, devono essere abbastanza caratteristiche e uniformi da poter servire come "candele standard": la loro distanza deve dunque poter essere inferita dalla loro luminosità apparente. Ma sfortunatamente nessuna classe riconoscibile di galassie è "standardizzata" in questo modo con un'accuratezza che superi il venti per cento.

Ma il problema peggiore è che le galassie, invecchiando, evolvono. Le galassie d'importanza cruciale per i controlli in cosmologia vengono viste a meno della metà della loro età attuale: la loro luce ha impiegato fra i cinque e i dieci miliardi di anni per arrivare fino a noi. Anche nel caso in cui le galassie di uno specifico tipo riconoscibile costituissero delle "candele standard" abbastanza precise attualmente, bisognerebbe sempre sapere come cambi la luce della candela via via che si consuma.

Le galassie, nella loro gioventù, dovrebbero aver contenuto molte stelle assai splendenti, ora morte; e le loro stelle dovrebbero trovarsi nei primi stadi dell'evoluzione. Col senno del poi c'è da stupirsi che Sandage e altri si siano imbarcati in questa impresa senza prima studiare debitamente questo problema. I primi calcoli seri di come si evolvano le galassie furono effettuati nel 1967 nella tesi di dottorato di Beatrice Tinsley, una ricercatrice neozelandese che lavorava alla University of Texas. Esaminando i colori e gli spettri di galassie ben studiate nelle nostre vicinanze, Tinsley riuscì a inferire quale

"miscela" di stelle dovessero contenere e, in particolare, i rapporti fra le varie masse stellari. Gli astrofisici già ne sapevano abbastanza su come evolvano le stelle per poter calcolare come sarebbe apparsa una stella di un qualsiasi tipo quando era più giovane. Facendo una media sulle storie evolutive di stelle di massa diversa, nei rapporti appropriati alle galassie vicine che aveva osservato, lei riuscì a calcolare come sarebbero apparse quelle galassie qualche miliardo di anni fa. Scoprì che la popolazione stellare aggregata in una galassia, invecchiando, avrebbe emesso una luce più fioca; le galassie giovani avrebbero dovuto essere sostanzialmente più risplendenti. Non ci sarebbero stati dunque grandi ostacoli se questo effetto fosse stato facilmente calcolabile e misurabile. Ma, disgraziatamente, esso, e il tasso di formazione delle stelle nelle galassie rispetto alla durata della loro vita non erano all'epoca (né lo sono ancora) conosciuti accuratamente.[5]

Le galassie evolvono anche per un'altra ragione. Non sono sistemi isolati, autocontenuti: molte di esse sembrano scontrarsi e fondersi con altre.[6] La stessa nostra Galassia dovrà subire questo destino: Andromeda le sta cadendo addosso e fra circa cinque miliardi di anni questi due grandi dischi galattici si scontreranno e ciò che rimarrà di essi assomiglierà probabilmente a un amorfo, enorme mucchio di stelle, simile a una galassia ellittica. Le galassie grandi acquistano massa e splendore cannibalizzando le loro vicine più piccole. Il che ovviamente implica che, a parità di tutte le altre condizioni, nel passato dovrebbero essere state più deboli.

Le galassie "evolvono" in due modi, dunque. La popolazione stellare originaria si va affievolendo con l'età, ma la galassia subisce *un'illuminazione* compensativa perché acquista altre stelle dalle sue compagne che le cadono dentro, perdendo la loro individualità. Questi effetti agiscono in direzioni opposte: entrambi possono essere abbastanza importanti da mascherare la differenza fra una decelerazione lieve e una molto spinta, ma, purtroppo, nessuno dei due può venire calcolato con sufficiente accuratezza. La misurazione diretta della decelerazione cosmica rimarrà problematica fintanto che

non riusciremo a capire compiutamente come aumenti o si affievolisca la luminosità di una galassia via via che invecchia.

I telescopi dotati dei moderni equipaggiamenti possono rilevare spostamenti verso il rosso più grandi di quelli che Sandage riusciva a osservare. Ma ciò non ha aiutato a determinare la decelerazione cosmica: vediamo oggi, direttamente, l'epoca in cui le galassie si erano appena formate e gli effetti evolutivi erano ancora più grandi e ancor più indeterminati. Lo Space Telescope, collocato al di sopra degli effetti di disturbo dovuti all'atmosfera terrestre, ci offre una visione di galassie lontanissime abbastanza precisa da mostrarci la loro forma e la loro struttura. E, in effetti, sono diverse dalle galassie a noi vicine. Molte di esse appaiono strane e irregolari, gran parte della loro luce proviene da nubi di gas risplendente che non ha ancora raggiunto un equilibrio o non si è ancora trasformato in stelle.

Verso la fine degli anni Sessanta ci fu la fuggevole speranza che i quasar (che erano stati appena scoperti) avrebbero aiutato molto a risolvere il problema. I quasar, in fin dei conti, sono come dei fari iperluminosi, fino a cento volte più splendenti di una galassia e facilmente rilevabili anche se con spostamenti verso il rosso molto elevati. Quelli più distanti sono così lontani da noi che la loro luce fu emessa quando il nostro universo aveva appena un decimo della sua età attuale. I quasar si evolvono in modo molto drammatico. Un ipotetico astronomo che stesse osservando l'universo quando erano trascorsi appena due miliardi di anni dal Big Bang, quando cioè le galassie si stavano ancora formando, avrebbe percepito un ambiente celeste molto più attivo e spettacolare. Le galassie erano allora molto più inclini a indulgere in scoppi di attività, forse perché nella loro giovinezza era disponibile molto più gas non ancora condensato per formare e nutrire i buchi neri centrali. Ma non riusciamo a capire questo tipo di attività abbastanza bene per riuscire a spiegarlo allo stesso modo in cui Beatrice Tinsley riuscì a calcolare l'evoluzione del contenuto stellare delle galassie.

I telescopi sono oggi abbastanza potenti da rilevare esplosioni di supernove in galassie molto lontane. La "bomba stellare" che scatena queste esplosioni ha proprietà standardizzate che gli astrofisici riescono a capire sicuramente meglio dell'evoluzione di una galassia intera. Questi eventi potrebbero forse fornire quelle "candele standard" di cui finora siamo stati privi.

Ma il nostro universo è più vecchio delle sue stelle più vecchie?

Se l'espansione fosse andata decelerando fortemente, il nostro universo si sarebbe espanso con molta più velocità nel passato, e il Big Bang non sarebbe avvenuto così tanto tempo fa. Si può quindi forse escludere che omega abbia un valore molto elevato perché una forte decelerazione implicherebbe che l'universo sia più giovane delle stelle più vecchie che contiene, il che è ovviamente un'assurdità.

Le stelle più pesanti e luminose sono quelle che bruciano il loro idrogeno più velocemente e che vivono di meno. Se le stelle di un certo gruppo si sono formate tutte alla stessa epoca, quelle molto più pesanti del Sole brucerebbero relativamente presto, quelle come il nostro Sole morirebbero dopo circa dieci miliardi di anni, e le stelle con una massa pari a 0,7 volte quella solare continuerebbero a brillare per quindici miliardi di anni. Gli astronomi possono quindi datare un gruppo di stelle coeve determinando la massa delle stelle più pesanti che sono sopravvissute: tanto più è piccola, tanto più vecchio deve essere il gruppo.

Dedurre la massa di una stella qualunque dal modo in cui ci appare non è però una cosa banale. Le indeterminazioni della teoria e quelle delle osservazioni si combinano in modo da introdurre una certa elasticità nella stima degli anni. Molti esperti comunque scommetterebbero la loro reputazione scientifica (e anche dei soldi) sul fatto che alcuni gruppi di stelle abbiano almeno dodici miliardi di anni – abbassargli ancora l'età urterebbe molte radicate e venerate convinzioni riguardo

alla struttura stellare. Il tempo trascorso dal Big Bang a oggi deve dunque essere maggiore di dodici miliardi di anni.

Se si potesse ignorare la decelerazione cosmica (in altre parole, se omega fosse molto piccolo) il tempo trascorso dal momento del Big Bang sarebbe semplicemente la distanza di una galassia divisa per la sua attuale velocità di recessione. (La legge di Hubble implica che la velocità sia proporzionale alla distanza, così questo "tempo di Hubble" è lo stesso quale che sia la galassia usata per fare il conto.) Ma per calcolare quanto tempo ci metterete per fare un viaggio dovete dividere la distanza da percorrere per la velocità *media*. Se la decelerazione fosse esattamente pari a quella necessaria per arrivare ad arrestare l'espansione (un universo con $\Omega = 1$) la velocità di espansione media sarebbe 1,5 volte più alta di quella che è ora: l'età dell'universo sarebbe quindi 1/1,5 volte il tempo di Hubble: solo i 2/3. Le stelle più antiche ci dicono, dunque, qualcosa di molto importante sulla cosmologia; forse la loro esistenza esclude la possibilità di un valore di omega maggiore di 1.

Questo tipo di ragionamento sarebbe efficacissimo se conoscessimo il tempo di Hubble. Le velocità di recessione sono note: lo spostamento verso il rosso è facile da misurare. Ma per poterne inferire il tempo di Hubble dovremmo conoscere anche la *distanza* delle galassie. E queste distanze sono a tutt'oggi frustrantemente controverse.

Le distanze cosmiche e il tempo di Hubble

Le distanze cosmiche sono misurate da una rete di metodi interconnessi. Alcune stelle (quelle più vicine) mutano la loro posizione se vengono osservate a sei mesi di distanza: questo semplice effetto di parallasse, dovuto al cambiamento del nostro punto di osservazione mentre la Terra gira intorno al Sole, ci permette di calcolare la distanza delle stelle che abbiamo nei dintorni. Questa "linea di base" ci permette di determinare le distanze di oggetti più remoti confrontando la loro luminosità relativa rispetto a quella di oggetti "standard". Per

esempio, se conosciamo quanto è distante una stella grazie al metodo della parallasse, allora una stella identica che ci appaia quattro volte più debole, dovrà essere (per la legge dell'inverso del quadrato) due volte più lontana. Possiamo dunque dedurre la distanza di questa seconda stella, anche se può essere troppo lontana perché se ne possa misurare la parallasse. La scala delle distanze può così venir allungata, gradino per gradino, sempre più lontano, usando una successione di oggetti intrinsecamente sempre più luminosi.

Ma procedure di questo tipo introducono errori e imprecisioni a catena, che si accumulano. Nonostante tutti gli sforzi, le misure del tempo di Hubble fino a poco tempo fa si collocavano in un intervallo compreso fra i 14 e i 20 miliardi di anni. (È fonte di imbarazzo che un numero di tale importanza sia tanto indeterminato, quando altre quantità astronomiche sono note con una precisione di 15 cifre decimali.)

Le candele standard più famose per misurare le distanze sono le stelle dette variabili Cefeidi. Queste stelle stanno attraversando una fase instabile del loro ciclo vitale e pulsano con un periodo di pochi giorni o poche settimane. Sappiamo come il periodo dipende dalla loro luminosità intrinseca: più lungo è il periodo, più luminosa è la stella. L'importanza delle Cefeidi deriva dal fatto che sono abbastanza luminose da poter essere viste anche nelle galassie esterne più vicine.

Uno dei cosiddetti "progetti chiave" dello Space Telescope è quello di utilizzare le variabili Cefeidi per determinare le distanze delle galassie. Anche se il suo specchio è più piccolo di quello di molti telescopi al suolo (2,4 metri di diametro), può rilevare queste stelle fino a distanze più grandi. Infatti, i raggi di luce che arrivano a un telescopio al suolo sono disturbati dalle irregolarità dell'atmosfera del nostro pianeta. Lo Space Telescope concentra la luce che proviene da una stella debole in un'immagine dieci volte meglio risolta; stelle debolissime si possono osservare più chiaramente sullo sfondo della debole luce di fondo del cielo. Quando lo Space Telescope avrà osservato le variabili Cefeidi in un numero sufficiente di galassie (comprese galassie lontane come quelle dell'Ammasso della

Vergine, l'ammasso galattico più vicino a noi) l'attuale indeterminazione nella scala delle distanze cosmiche si dovrebbe ridurre a non più del dieci per cento.

Si potrebbero saltare gli incerti gradini di questa scala di distanze se potessimo effettivamente *calcolare* la luminosità intrinseca di un qualche tipo di oggetto luminoso visibile a grande distanza; ci sono fondate speranze di arrivare a capire le supernove abbastanza bene da poterle utilizzare per questo scopo.

Già nel 1964 il cosmologo norvegese Sjur Refsdal aveva tuttavia proposto un altro approccio al problema, basato sul fenomeno delle *lenti gravitazionali*. Una galassia situata lungo la linea di vista produce a volte *immagini multiple* di un quasar molto distante: i raggi luminosi vengono incurvati dal campo gravitazionale della galassia, cosicché la luce del quasar ci arriva seguendo due o più cammini diversi. La lunghezza di questi cammini dovrebbe essere diversa, a meno che l'allineamento fra il quasar e la galassia che fa da lente gravitazionale non fosse assolutamente perfetto e simmetrico. I cammini differirebbero in lunghezza solo di una piccola percentuale, perché la luce viene deflessa appena appena: un cammino luminoso potrebbe, per esempio, essere più lungo dell'altro di una parte su cinque miliardi. Conoscendo solo gli *angoli* possiamo calcolare la differenza *percentuale* fra le lunghezze dei cammini; ma ci serve qualche altra informazione per poter stabilire la scala assoluta.

Questa informazione cruciale ci viene dal ritardo fra i segnali luminosi che ci arrivano seguendo i due cammini. I quasar non hanno una luminosità costante: si infiammano e si affievoliscono irregolarmente, nell'arco di giorni, settimane o anni. Ogni volta che un quasar visto attraverso una lente gravitazionale si accende di luce molto vivida, una delle due immagini, quella che corrisponde al cammino più corto, brilla prima dell'altra. Se, per esempio, i due cammini differiscono di una parte su cinque miliardi, un ritardo di un anno implicherebbe che il quasar è distante cinque miliardi di anni luce; un ritardo di due anni indicherebbe una distanza di dieci mi-

liardi di anni luce. Misurando il ritardo temporale fra i segnali che ci arrivano seguendo cammini lievemente diversi, possiamo misurare direttamente la distanza di oggetti estremamente remoti, saltando a piè pari tutti i pericolanti gradini intermedi della scala delle distanze cosmiche.

Se si scoprisse che il tempo di Hubble è sui venti miliardi di anni, allora persino i due terzi di questo periodo, corrispondenti all'età del nostro universo se omega fosse uguale a 1, rappresenterebbero un tempo comodamente più lungo dell'età delle stelle più antiche. (Per starci veramente comodi, ci dovrebbe essere almeno un miliardo di anni fra le due cifre, perché l'universo doveva avere almeno un miliardo di anni prima che cominciassero a formarsi le galassie.) Per contro, all'altro estremo dell'intervallo – un tempo di Hubble di 14 miliardi di anni – ci troveremmo in notevole imbarazzo, anche se non ci fosse alcuna decelerazione.

Né l'età delle stelle più vecchie, né il tempo di Hubble sono stati finora determinati abbastanza bene per farci sentire sicuri con un dato insieme di numeri. Ma le indeterminazioni stanno ormai scendendo al di sotto del livello del dieci per cento, senza che emergano contraddizioni eclatanti. E ci sono fondate speranze che le nuove tecniche possano ridurre l'indeterminazione con cui conosciamo omega. Se dovessi oggi come oggi azzardare una scommessa, direi che omega è in effetti uguale a 1 (e la materia distribuita in un qualche tipo di particelle ancora sconosciuto), e che il tempo di Hubble è abbastanza lungo da ovviare a qualsiasi serio conflitto con l'età delle stelle. Mi consolo anche con l'adagio di Francis Crick: nessuna teoria concorderà mai con tutti i dati, perché alcuni dati sono sicuramente sbagliati!

Cosa ci dicono l'elio e l'"idrogeno pesante"

Un modo di stimare il valore di omega è di compilare un inventario completo della materia oscura; un altro è quello di misurare la decelerazione cosmica. Un diverso tipo di ragio-

namento riesce a stabilire un tetto per l'ammontare della materia gravitante costituita da *atomi ordinari* (che si trovino in stelle, oggetti oscuri o gas diffuso) e non da forme esotiche di materia oscura. Questa limitazione deriva dal fatto che le reazioni nucleari dell'universo primordiale erano sensibili al modo in cui si trovavano addensati gli atomi in quei tempi.

Nei pochi minuti che occorsero al nostro universo per raffreddarsi da dieci miliardi a un miliardo di gradi, quasi il 25 per cento del materiale primordiale fu trasformato in elio (ne abbiamo parlato nel capitolo 3). Uno dei prodotti intermedi del processo di formazione dell'elio è il deuterio, che ha un nucleo costituito da un solo protone (come l'idrogeno) più (a differenza dell'idrogeno) un neutrone: è per questo motivo che viene chiamato anche "idrogeno pesante". Quanti più atomi sono contenuti in un dato volume di spazio, tanto più probabili sono le collisioni, e tanto meno probabile è che i nuclei di deuterio possano sopravvivere ai primi minuti senza essere trasformati in continuazione in elio.

Il deuterio è stato osservato nel gas interstellare e anche nel sistema solare. La sua "firma" caratteristica è stata vista anche negli spettri dei lontani quasar. Non può essere stato prodotto nelle stelle. Infatti, quando una stella si condensa nel gas interstellare, il deuterio in esso contenuto viene distrutto (e convertito in elio) prima che la stella diventi abbastanza calda per cominciare a bruciare l'idrogeno comune. Il deuterio è, come la maggior parte dell'elio, un fossile del Big Bang. Quando l'intero universo aveva una temperatura di un miliardo di gradi, abbastanza elevata per il verificarsi delle reazioni nucleari, i nuclei non potevano dunque essere addensati troppo strettamente, perché altrimenti il deuterio sarebbe stato tutto trasformato in elio e ne sarebbe sopravvissuto meno di quanto se ne osservi effettivamente.[7] Anche se questo argomento si riferisce a processi che si verificarono nei primissimi minuti, non comporta nessuna fisica esotica. Persino in quell'era il materiale primordiale non era più denso dell'aria, e i singoli nuclei atomici si muovevano a velocità che possono essere facilmente riprodotte in laboratorio. (È solo nel corso del

primo millisecondo – come discuteremo meglio nel capitolo 9 – che il materiale primordiale si trovava in un esotico stato iperdenso.) Le reazioni che produssero il deuterio e l'elio sono tutte ben controllate sperimentalmente; e i metodi con cui gli astronomi misurano i rapporti di questi elementi sono del tutto standard, tradizionali.

La conclusione importante cui si arriva è che gli atomi ordinari non possono contribuire per più di un decimo della densità critica: in altre parole non possono contribuire a un valore di omega maggiore di 0,1.[8] Il che permetterebbe appena (spingendo i numeri al massimo) di spiegare la materia oscura delle singole galassie come costituita da forme simili alle nane brune. Ma i moti delle galassie su grande scala, quelli che avvengono nei superammassi o che le spingono verso il Grande Attrattore, richiedono che omega valga come minimo 0,2 (anche se non ci sono chiare prove che debba avvicinarsi a 1).

Quanto più ampiamente è dispersa la materia oscura, tanto meno probabile è che sia costituita da atomi ordinari. In caso contrario uno dei "pilastri" della teoria del Big Bang – la concordanza fra i rapporti dell'elio e del deuterio – ci crollerebbe addosso.

L'universo è piatto?

In questo capitolo, e già ne avevamo parlato nel capitolo 6, si è sottolineato il fatto che il nostro universo contiene più di quello che possiamo vedere. A meno di non essere disposti a buttar via le leggi di Newton (e devo dire che non sono affatto incline a questa scelta), siamo costretti a concludere che le galassie sono attratte da forze gravitazionali su vasta scala indotte dalla materia oscura che consiste probabilmente di particelle esotiche piuttosto che di atomi ordinari.

Non sappiamo se esista abbastanza materia oscura da fornire una densità critica completa ($\Omega = 1$), cioè, come si usa dire, se il nostro universo sia effettivamente "piatto"; ma ci sono

alcune ragioni "filosofiche" generali che favoriscono questa opzione. Se omega fosse, per esempio, uguale a 2, l'universo smetterebbe completamente di espandersi dopo aver raddoppiato le sue dimensioni, e poi comincerebbe a collassare. D'altro canto, se omega fosse uguale a 0,5 l'espansione continuerebbe, ma la gravità (e la conseguente decelerazione) diventerebbe sempre meno competitiva con l'espansione: quando l'universo si fosse espanso di un fattore 2, omega sarebbe sceso a 0,25.

Ciò che almeno sappiamo è che omega, oggi come oggi, non differisce enormemente da 1: non c'è un tremendo squilibrio fra gli effetti della gravità e quelli dell'energia dell'espansione. Questo fatto ha forti implicazioni su come debba essere stato l'universo primordiale. Qual era il valore di omega quando furono creati l'elio e il deuterio, quando cioè il nostro universo aveva solo pochi secondi di vita? Una qualsiasi deviazione da 1 si sarebbe amplificata nel corso dell'espansione: se all'inizio omega fosse stato più piccolo di 1, l'energia cinetica l'avrebbe avuta rapidamente vinta e il valore di omega sarebbe crollato verso zero; se omega fosse stato sostanzialmente maggiore di 1, la gravità avrebbe ben presto arrestato completamente l'espansione. Il fatto che omega, ancor oggi, dopo dieci miliardi di anni, non si sia scostato molto da 1 significa che, quando il nostro universo aveva un secondo di vita, omega non poteva differire da 1 per più di 10^{-15}.

Il nostro universo è iniziato con un equilibrio incredibilmente ben registrato fra espansione e gravità. (La stessa argomentazione diventa persino più forte se si estrapola fino a epoche ancora più primordiali.) Il che porta a sospettare che questa "sintonizzazione" potrebbe anche essere esatta, nonostante che non ne possiamo essere ancora sicuri. Se fosse altrimenti, sembrerebbe una pura coincidenza il fatto che stessimo osservando l'universo proprio nell'epoca in cui la deviazione dalla piattezza si manifesterebbe per la prima volta. Questo richiama un argomento presente in un'altra branca della fisica, che riguarda la massa del fotone: gli esperimenti stabiliscono un limite superiore molto basso, minore di 10^{-55}

grammi; ma la maggior parte dei fisici sarebbe pronta a scommettere pesantemente sul fatto che questo numero, che si sa essere vicinissimo a zero, sia in effetti *zero*, per qualche ragione teorica profonda.

Questi pregiudizi sono sostenuti da un sospetto generale che l'universo intero abbia *un'energia netta esattamente uguale a zero*. Ogni cosa possiede energia, come vuole la famosa equazione $E = mc^2$. Ma tutti i corpi, influenzandosi reciprocamente con la loro gravità hanno anche un'energia *negativa* (detta la loro "energia di legame" gravitazionale). Per esempio, occorre energia per sollevare un oggetto dalla superficie della Terra fino allo spazio profondo; inversamente, quando qualcosa cade sulla Terra questa energia viene liberata. Qual è l'energia di legame gravitazionale di una particella dovuta a tutto il resto delle cose che esistono nell'universo? Una semplice stima mostra che deve essere dell'ordine di $E = mc^2$, l'energia della massa a riposo. Viene spontaneo congetturare che queste due energie (di segno opposto) siano precisamente uguali: la creazione di tutta la materia sarebbe avvenuta a "costo zero".

I teorici hanno sviluppato un atteggiamento mentale diverso nel corso degli anni Ottanta. Ciò è stato in parte dovuto al fatto che si cominciò a prendere sul serio la possibilità che esistano particelle esotiche sopravvissute alle prime fasi dell'universo caldo, tanto sul serio che questa sembrava essere diventata un'aspettativa quasi naturale. Ma l'elemento nuovo più importante è stato il concetto di universo inflazionario, che descriveremo nel capitolo 10. Secondo quest'idea, l'universo, nei suoi primissimi stadi, è cresciuto in modo esponenziale. Sarebbe stato stirato fino a ridursi a "piatto", diventando così molto più grande della scala del nostro orizzonte attuale, e l'energia cinetica e quella gravitazionale sarebbero in equilibrio quasi perfetto. Questa concezione ha un forte richiamo, anche perché risolve in modo naturale alcuni ben noti e ostinati paradossi cosmologici; e instilla un forte pregiudizio sul fatto che, mettendo insieme tutte le possibili forme di materia e di

energia del nostro universo, dovremmo ottenere esattamente la densità critica.

La repulsione cosmica e lambda

Poco tempo dopo aver realizzato la sua teoria della gravità, cioè la relatività generale, Einstein si rese conto che essa permetteva la possibilità di un universo *statico*, oggi noto come l'"universo di Einstein". È un universo finito, eterno e illimitato: un raggio di luce ritorna al suo punto di origine, e inizia un nuovo giro, dopo un tempo ben definito che dipende da qual è la densità dell'universo. Per far obbedire questo universo alle sue equazioni, Einstein dovette però introdurre un'ulteriore complicazione: la cosiddetta "costante cosmologica", indicata con la lettera greca lambda, che dà luogo, anche nello spazio vuoto, a una forza repulsiva proporzionale alla distanza. Un universo può rimanere statico se la repulsione cosmica equilibra esattamente l'attrazione gravitazionale della materia (che, in tutte queste cosmologie idealizzate, si suppone riempia lo spazio in modo liscio e uniforme).

Quando si scoprì che il nostro universo reale si espandeva, Einstein disse che inserire quella ulteriore complicazione nelle sue equazioni era stata "la più grande balordaggine della mia vita". Gli aveva impedito di *predire* l'espansione che invece Hubble *scoprì*; Aleksandr Fridman si era già accorto che di lambda non c'era bisogno in un universo in espansione o in contrazione.

La motivazione che aveva originariamente spinto Einstein a introdurre lambda fu presto abbandonata. Ma ciò non screditò l'idea che lo spazio vuoto potesse influenzare la dinamica cosmica. Anzi, lambda fu in seguito fatta resuscitare abbigliata di panni più moderni come "l'energia del vuoto". Secondo le equazioni di Einstein, un'energia del vuoto provocherebbe una "repulsione gravitazionale" esattamente equivalente alla lambda originaria.[9]

Sappiamo che lambda deve essere molto piccola. La repul-

sione cosmica non influenza in modo avvertibile le orbite del nostro sistema solare, né i moti sulla scala delle galassie. Può, al più, competere con gli effetti gravitazionali della materia galattica diffusa – cosa importante per l'espansione cosmica nel suo complesso, ma non all'interno di singoli oggetti. I teorici che si preoccupano di cercare di capire la struttura dello spazio su scale piccolissime rimangono perplessi nel constatare che l'energia del vuoto non è invece *enorme*, simile alla densità dell'universo in quelle primissime epoche in cui gli vennero impresse le forze fondamentali. Alcuni processi possono sopprimerla, o eliderla. Ma può diventare esattamente zero? Le idee sul perché lambda sia così piccola sono ancora molto, troppo speculative (invocano l'esistenza di "*wormholes*", quasi "cunicoli di tarli" che ci connetterebbero con altri universi, e concetti analoghi). Inoltre, come vedremo nel capitolo 12, il suo valore potrebbe cambiare in qualche epoca futura, presumibilmente con conseguenze catastrofiche.

Via via che un universo si espande, l'influenza gravitazionale della materia ordinaria diminuisce col suo diventare sempre più rarefatta. A meno che lambda non sia esattamente zero, la repulsione cosmica finisce con l'avere la meglio e fa accelerare l'espansione. Potrebbe anche darsi che i singoli ammassi di galassie, con le loro stelle, gas e materia oscura costituiscano un buon campione statistico del materiale di cui è fatto l'universo e che non ci sia abbastanza materia oscura, in nessun posto del mondo, per far salire il valore di omega molto al di sopra di 0,2. I teorici che richiedono un universo piatto in cui la densità cosmica di massa-energia sia esattamente quella critica dovrebbero allora introdurre l'energia del vuoto per "far quadrare il bilancio". Parte del disagio che si avverte di fronte a questo scenario dipende dal fatto che sembra una coincidenza (o una sintonizzazione molto fine) che la repulsione cosmica debba averla vinta proprio in questa nostra era, che tale transizione avvenga ora, e non nel lontano passato o nel remoto futuro.

Lambda ha implicazioni interessanti (e attraenti) per ciò che riguarda l'età dell'universo. Fa accelerare l'espansione,

vale a dire ha l'effetto opposto di quello della materia ordinaria (stelle, gas e materia oscura), la cui gravità tende invece a farla gradualmente rallentare. La velocità media di espansione del nostro universo potrebbe dunque essere stata *minore* di quella attuale, e la sua età potrebbe essere *maggiore* del tempo di Hubble. Per contro, senza lambda, l'età dell'universo è sempre più piccola del tempo di Hubble, per una quantità che dipende da omega.

Se, quando le misure saranno più precise, si scoprisse che il tempo di Hubble si trova all'estremo inferiore dell'intervallo correntemente calcolato, allora lambda potrebbe salvarci dal busillis di stelle che ci appaiono più vecchie dell'età dell'universo. La maggior parte dei cosmologi la considererebbe una "brutta" soluzione, perché non vorrebbero introdurre un altro numero (diverso da zero) nella loro disciplina. Ma la storia sembra dirci che questo pregiudizio potrebbe anche rivelarsi miope. Galileo non si sentiva a suo agio quando Keplero mostrò che i pianeti si muovevano seguendo ellissi e non cerchi perfetti: sembrava meno "naturale", certamente meno elegante. Newton, più tardi, mostrò che le ellissi erano le conseguenze naturali della sua legge di gravitazione universale. La spiegazione di Newton, più profonda, avrebbe sicuramente riconciliato entusiasticamente Galileo con le leggi di Keplero. Similmente, quando capiremo meglio le leggi che governano il multiverso, potremo forse renderci conto di quanto fosse ristretta e distorta la prospettiva che oggi adottiamo. L'universo piatto, con lambda uguale a zero, potrà allora sembrare atipico e speciale, proprio come, da Newton in poi, atipiche e speciali ci sembrano le orbite circolari.[10]

Cosa c'è al di là del nostro orizzonte attuale?

I nostri discendenti avranno davanti a sé un futuro infinito? O tutte le cose verranno risucchiate in una strizzata universale, in un "Big Crunch"? Sono questi i contrastanti futuri che i cosmologi hanno in genere discusso (e su cui sarebbe bene scommettere con forti dosi di prudenza). La risposta dipende da omega, il rapporto fra densità media e densità critica. Assai pochi sono i cosmologi oggi a favore di un valore di omega grande, per esempio 2, valore che sarebbe necessario perché l'universo si ricontraesse nel giro dei prossimi cento miliardi di anni. Il problema è piuttosto se la densità media è ben al di sotto del valore critico (cosicché omega sarebbe intorno a 0,2) o se è invece così vicina al valore critico che, anche se il *crunch* finale finisse col vericarsi, la cosa sarebbe molto meno drammatica perché tutte le stelle sarebbero ormai morte da un bel pezzo e forse anche tutti gli atomi sarebbero ormai decaduti.

Se la grande strizzata fosse destinata a verificarsi nel giro, diciamo, di cento miliardi di anni, ci dovremmo trovare in un universo "chiuso", il cui contenuto totale sarebbe solo poche volte più grande di ciò che possiamo vedere. Circa un quinto di questo volume totale sarebbe già visibile; cosicché basterebbe un'estrapolazione limitata per permetterci di inferire che il resto è simile a quello che vediamo. Se abbiamo già visto circa la metà dell'universo, è solo una moderata estrapolazione asserire che tutto il resto è simile e che si raccorda con continuità con la parte che vediamo.[11] Ma se trascorresse un tempo sufficiente perché la luce possa arrivarci da zone assai *lontane* dal nostro orizzonte attuale, potrebbero diventare visibili dei domini cosmici drasticamente diversi dall'universo attualmente osservabile.[12]

Se il nostro universo continuasse a espandersi per tempi molto più lunghi, tutto ciò che possiamo osservare – il cosiddetto "universo osservabile" – finirà col sembrare una configurazione locale, una piccola macchia al confronto del più vasto orizzonte cui si potrebbe spingere la vista di un osservatore. La luce di galassie collocate ben al di là del nostro orizzonte finirebbe, con l'andar del tempo, con l'arrivare fino a noi. Questa prospettiva solleva un problema fondamentale: la regione grande dieci miliardi di anni luce che oggi osserviamo è tipica di tutto il resto? I nostri ipotetici lontanissimi pronipoti continuerebbero a vedere più o meno le stesse cose che vedia-

mo noi?[13] Ci sarebbe da stupirsi se la scena cosmica cambiasse *esattamente al di là dei limiti delle nostre osservazioni effettive*: un po' come ci stupiremmo, se gettati in un punto scelto a caso dell'oceano, scoprissimo che c'è una costa continentale appena mezzo miglio al di là dell'orizzonte.

Il tempo già trascorso dall'epoca del Big Bang a ora non supera di tre volte l'età del nostro pianeta. Anche se in cosmologia entrano in gioco distanze che superano di gran lunga quelle terrestri, le *scale temporali* della storia cosmica non sono molto più grandi di tre volte la vita della Terra, né sono molto più grandi di quelle cui i geologi sono abituati. E forse ciò significa che siamo ancora vicini all'inizio. Se omega fosse prossimo al valore critico, a 1, ma lo superasse anche solo di poco, il nostro universo avrebbe davanti a sé eoni di espansione, anche se il suo destino sarebbe, inevitabilmente, quello di contrarsi di nuovo.

NOTE

1. Ci si può sentire un po' a disagio ad applicare all'intero universo un risultato basato sulla teoria newtoniana della gravità. Ma anche se non si possono descrivere appropriatamente le proprietà della propagazione della luce, per tacere di quelle globali di un universo, senza usare una teoria più raffinata quale la relatività generale einsteiniana, nondimeno la dinamica dell'espansione *è* più o meno la stessa di quella fornita dalla teoria di Newton.

2. La densità critica di 5 atomi per un metro cubo qui citata corrisponde a un tempo di Hubble t_H di 15 miliardi di anni; la densità critica effettiva dipende da $1/t^2_H$. Fortunatamente, molte tecniche per misurare le densità cosmiche dipendono nello stesso modo da t_H. L'indeterminazione della valutazione del tempo di Hubble di cui si parla in questo capitolo non introduce necessariamente indeterminazioni corrispondenti nella stima di Ω. Ma, ahimé, queste densità sono difficili da precisare per ragioni del tutto diverse!

3. Solo in questo sistema di riferimento vedremmo l'universo molto lontano che si espande isotropicamente allontanandosi da noi. Qualsiasi altro osservatore vedrebbe spostamenti verso il rosso più piccoli nella direzione in cui si muove ma spostamenti verso il rosso più consistenti nella direzione opposta.

4. Ciò di cui abbiamo realmente bisogno è una qualche tecnica per rivelare concentrazioni di materia oscura sulla scala dei superammassi, che permettano di saltare a piè pari tutte le indeterminazioni legate ai moti e alle distanze galattiche oltre che alle relazioni delle singole galassie con la materia oscura. Un nuovo approccio consiste nel cercare distorsioni di immagini di galassie molto lontane dovute all'incurvamento gravitazionale della luce provocato da un superammasso posto lungo la linea di vista. Tali distorsioni sono già state osservate in galassie poste dietro ad ammassi (vedi capitolo 6). La materia oscura di un superammasso dovrebbe essere meno concentrata che in un ammasso e quindi potrebbe anche non creare immagini altrettanto distorte o ingrandite. Ma i superammassi sono oggetti celesti così grandi che dietro a ognuno di essi potrebbero esserci centinaia di migliaia di galassie deboli. Esse verrebbero distorte in modo correlato, cosicché una distorsione anche solo di pochi punti percentuali potrebbe venir rilevata statisticamente se influenzasse tutte le galassie sullo sfondo nello stesso modo.

5. Beatrice Tinsley divenne professore alla Yale University, ma morì di cancro nel 1981. Non c'è dubbio che avrebbe potuto avere un ruolo guida nell'interpretare le meravigliose osservazioni di galassie remote prodotte dallo Space Telescope negli anni Novanta.

6. Le distanze fra le galassie sono solo dieci volte più grandi delle loro dimensioni complessive, e sono ancora più ridotte negli ammassi di galassie. Per contro, le stelle all'interno di una galassia sono distanziate di milioni di volte i loro diametri. Le collisioni fra galassie non sono particolarmente rare; è invece ben raro che le stelle si scontrino l'un l'altra, eccezion fatta, forse, per i nuclei centrali delle galassie dove la loro concentrazione è particolarmente elevata.

7. Questo vincolo sulla densità dei nuclei atomici nell'universo primordiale stabilisce in modo molto semplice un limite anche alla densità *attuale* degli atomi. L'espansione (e la conseguente rarefazione), infatti, è direttamente correlata alla diminuzione della temperatura. La temperatura attuale è appena inferiore a 3 gradi sopra lo zero assoluto. Nel raffreddarsi da 3 miliardi di gradi a questa temperatura, l'universo si dovrebbe essere espanso di un miliardo (10^9) di volte, e la sua densità dovrebbe essere scesa di un fattore pari a 10^{27}. Queste stime possono essere raffinate mettendo in conto la distruzione di deuterio nelle stelle, e aggiustando le percentuali dell'elio e anche del litio (un elemento raro, che si ritiene di origine primordiale, come il deuterio e l'elio).

8. Il vincolo preciso dipende dal tempo di Hubble t_H. Il numero citato nel testo è un limite superiore piuttosto generoso. Ci sono stati tentativi di sfuggire a questa conclusione, o almeno di indebolirla, supponendo che i barioni nell'universo dei primordi fossero "agglutinati" e non distribuiti uniformemente. Si tratta però di un rimedio *ad hoc*, senza nessuna motivazione teorica. E in ogni caso non risulta che si allargherebbe molto l'intervallo di densità accettabile.

9. Questo concetto di energia del vuoto lo ritroveremo nel capitolo 10, in connessione con la fase inflazionaria dell'universo ultra-primordiale. Secondo questa teoria il vuoto aveva inizialmente un'energia molto alta (equi-

valente a un valore di lambda molto grande). Da questo punto di vista non sembra esserci alcuna obiezione al fatto che oggi lambda sia diverso da zero: il mistero, anzi, è perché non sia *inaccettabilmente grande*.

10. Il multiverso può racchiudere universi con tutti i possibili valori di lambda. Le galassie non potrebbero formarsi in un universo con lambda troppo grande: la repulsione cosmica prevarrebbe prima che esse potessero condensarsi. Dunque, anche se lambda è grande in un universo tipico, non dobbiamo sorprenderci di vivere in uno dove lambda è un numero piccolo.

11. Da un punto di vista matematico è persino possibile che il nostro universo sia "molteplicemente connesso". Ciò implicherebbe che la nostra zona locale potrebbe espandersi per sempre, anche se ci trovassimo in un universo "piccolo" dal quale vedremmo sempre lo stesso volume finito ripetersi e ripetersi in una specie di struttura a reticolo di celle giustapposte, un po' come in un caleidoscopio. Fino a pochissimo tempo fa, non era una cosa tanto semplice riuscire a mettere alla prova questa possibilità, per strana che possa sembrare. Possiamo però oggi escludere una "dimensione di cella" più piccola della parte di universo che possiamo osservare. La prova deriva dal fatto che non si osservano duplicati di strutture cospicue come i superammassi e le grandi muraglie. Inoltre, gli scostamenti dall'uniformità della temperatura della radiazione cosmica di fondo rilevati da COBE mostrano l'esistenza di onde su tutte le scale fino al raggio di Hubble: non c'è alcun indizio che esse siano troncate a un'ipotetica dimensione di cella più piccola di tale raggio.

12. Negli universi senza lambda l'espansione decelera, dato che tutto esercita un'attrazione gravitazionale su tutto il resto. Se la densità è effettivamente vicina al valore critico (in altre parole se $\Omega = 1$), la legge di decelerazione sarebbe estremamente semplice: quando le galassie si fossero allontanate di 4 volte rispetto alle loro attuali distanze, l'universo sarebbe 8 volte più vecchio di ora (e non solo 4, come accadrebbe se l'espansione non rallentasse affatto). Una sfera in espansione di raggio R ha un'energia gravitazionale proporzionale a $1/R$ e un'energia cinetica che dipende dal quadrato della velocità di espansione. Per $\Omega = 1$ il bilancio energetico complessivo di una sfera "scavata" dall'universo in espansione è esattamente zero, dato che l'energia cinetica (positiva) risulta uguale all'energia gravitazionale (negativa). Se l'universo si espande di un fattore 4, l'energia di legame gravitazionale della sfera diminuirebbe di un fattore 4. Dato che l'energia cinetica è proporzionale al quadrato della velocità e dato che dovrebbe diminuire dello stesso fattore, anche il quadrato della velocità scenderebbe di un fattore 4, e la velocità, quindi, di un fattore 2. L'età dell'universo (R/v) che è data dal rapporto fra raggio (R) e velocità (v), per un'espansione di un fattore 4, crescerà quindi di un fattore 8 $\frac{4R}{v/2} = 8\frac{R}{v}$), e di altrettanto crescerà la distanza che la luce può percorrere (cioè la distanza dall'orizzonte). Tuttavia, a quello stadio, le galassie si saranno allontanate solo di quattro volte. Tutto ciò che è oggi visibile in quel futuro remoto si troverà a meno di metà strada dall'orizzonte. L'orizzonte a quell'epoca abbraccerà dunque $2^3 = 8$ volte più galassie di ora.

13. La temperatura di fondo è la stessa, fino a una parte su centomila, in qualsiasi direzione osserviamo. Le deviazioni dall'omogeneità sono dunque piccole sulla scala dell'orizzonte attuale. Possiamo anche inferire qualcosa su possibili "addensamenti" od ondulazioni presenti su scale un po' più grandi del raggio di Hubble, perché il gradiente risultante renderebbe la radiazione cosmica di fondo più calda da una parte del nostro universo piuttosto che da un'altra. Ma le osservazioni non stabiliscono alcun vincolo su scale mille volte più grandi del nostro orizzonte attuale, perché su scale simili eventuali disomogeneità creerebbero un gradiente così lieve da essere irrilevabile nel dominio che possiamo osservare.

9

RITORNO ALL'INIZIO

Col crescere della distanza la nostra conoscenza sbiadisce assai rapidamente. Finiamo col raggiungere quell'indistinta frontiera segnata dai limiti estremi del nostro telescopio. E qui misuriamo ombre, e persi in mezzo a fantasmatici errori di misurazione cerchiamo di trovare punti di riferimento, ahimé, a loro volta dotati di ben poca sostanza. Ma la ricerca continuerà. Fintanto che le risorse empiriche non saranno completamente esaurite non dovremo avventurarci nel regno dei sogni della speculazione.

EDWIN HUBBLE, *Realm of the Nebulae* (1936)

Stiamo arrivando a capire come, iniziando con un semplice Big Bang, possa esserne emerso dopo qualche frazione di secondo il nostro cosmo attuale, così complesso e ricco di struttura. Ma perché il nostro universo era così ben "sintonizzato" da espandersi a una velocità che apparentemente è stata regolata con tanta precisione? Un altro fatto sorprendente è che il suo tasso di espansione sia lo stesso in tutte le direzioni. Perché il nostro universo è stato dotato della miscela di atomi e radiazione che possiamo osservare? Perché, nonostante la sua uniformità complessiva, contiene quelle fluttuazioni, quelle "increspature" senza le quali gli atomi sarebbero rimasti un gas amorfo e freddo? Perché i semplici "modelli cosmologici" (che risalgono ai lavori di Aleksandr Fridman degli anni Venti) ci danno approssimazioni così meravigliosamente buone? Perché il nostro universo ha quell'uniformità che rappresenta un prerequisito del progresso della cosmologia?

Sono tutti problemi davvero fondamentali. Ma non c'è

nulla di nuovo in *questo genere* di domande. Torniamo indietro di 300 anni, a Newton. Aveva mostrato perché i pianeti percorrono orbite ellittiche muovendosi intorno al Sole, un fatto che già Keplero aveva scoperto ma che continuò a sembrare misterioso fino a che Newton non dimostrò che era una conseguenza diretta della sua legge dell'inverso del quadrato della distanza, della legge di gravitazione universale. Ma rimaneva un mistero, agli occhi di Newton stesso, perché i pianeti fossero organizzati in modo che le loro orbite fossero collocate quasi sullo stesso piano. Nell'*Ottica* scriveva: "Il cieco fato non potrebbe mai far muovere tutti i pianeti in orbite concentriche tutti allo stesso modo [...]. Tale meravigliosa uniformità del sistema planetario deve essere spiegata come risultato ed effetto di una scelta".

Questa coplanarità è stata oggi compresa: è una naturale conseguenza dell'origine del sistema solare, nato da un disco di polveri rotanti che si condensò nei pianeti (vedi capitolo 1). Ma la demarcazione stridente fra i fenomeni che si spiegano in termini di leggi conosciute e quelli che dipendono da misteriose "condizioni iniziali" esiste ancora, acuta come ai tempi di Newton: in certe situazioni siamo ancora ridotti a dirci che "le cose sono quelle che sono perché erano quelle che erano". I progressi della ricerca hanno sospinto indietro questa barriera, a tempi enormemente precedenti l'origine del nostro sistema solare, addirittura fino all'epoca in cui il nostro universo era una palla di fuoco caldissima, dieci miliardi di gradi, che si era espansa per la durata di un solo secondo, tutta uniforme, salvo che per lievi increspature che si condensarono, molto, molto più tardi nelle strutture del cosmo.

Viene spesso chiesto ai cosmologi come si colleghino i più avanzati risultati della loro disciplina ai temi della religione e della filosofia. La mia personale risposta non è di quelle eccitanti. Nonostante tutto quello che abbiamo imparato e impariamo sul cosmo, non credo che l'interfaccia con i filosofi e i teologi sia, in linea di principio, in alcun modo diversa da quella che era al tempo di Newton.

Ma non possiamo spingere la barriera più indietro ancora

del primo secondo del Big Bang? Non possiamo arrivare fino alla primissima *frazione* di secondo?

Tre numeri cosmici

Quando "l'orologio cosmico" segnava solo un secondo, una "ricetta "per cucinare il nostro universo avrebbe richiesto solo pochi ingredienti. Si tratta di numeri e forse solo di tre:

– Il primo specifica la densità media di *tutte* le forme di materia, luminose e oscure. Questo numero, **Ω**, è stato discusso nel capitolo 8: misura quell'equilibrio fra la gravità e l'energia cinetica che controlla il destino ultimo del nostro universo.

– Dobbiamo anche sapere quale forma assume questa materia. Il numero dei protoni e dei neutroni (collettivamente chiamati "barioni") si può convenientemente misurare rapportandolo a quello dei *fotoni* (o quanti di radiazione), noto con grande accuratezza grazie alle misure effettuate dal COBE della radiazione cosmica di fondo. Questo rapporto è molto piccolo: un barione circa per ogni miliardo di fotoni. Ma un universo "cucinato" senza dargli questa spolveratina di barioni – gli atomi ordinari, quelli che formano le stelle e i gas delle galassie – sarebbe un universo oscuro e amorfo, del tutto diverso dal nostro. I barioni contribuiscono a determinare il valore di omega, ma altri tipi di particelle sopravvissute al Big Bang potrebbero contribuirvi in misura ancora maggiore: se così fosse, anch'esse dovrebbero far parte della lista di ingredienti.

– Da ultimo, dobbiamo specificare l'ampiezza delle increspature primordiali che si evolvono in galassie, ammassi, superammassi. Questo numero, *Q*, è all'incirca 10^{-5} (vedi capitolo 7).

Questi numeri bastano a determinare le principali caratteristiche del nostro universo attuale. Una volta che siano state specificate, possiamo in linea di principio passare a una simulazione computerizzata dell'evoluzione cosmica, che termina

con l'universo raffreddato a 2,7 gradi Kelvin (vedi capitolo 7): dopo un miliardo di anni, si condensano le galassie; si agglomerano poi negli ammassi e in strutture cosmiche ancora più grandi. Possiamo confrontare l'universo che abbiamo "cucinato" nel calcolatore con quello che gli astronomi vedono realmente.

Il punto di partenza di questa simulazione è un universo che ha già vissuto il suo primo secondo, specificato da soli tre numeri. Ma possiamo arrivare a capire questi tre numeri in termini di principi ancora più fondamentali facendo arretrare la barriera ancora più indietro nel passato?

Indietro fino al primo microsecondo

Il nostro mondo quotidiano è governato dalla struttura atomica e dalla gravità; questa stessa fisica ormai ben sperimentata (più quella dei nuclei atomici) basta per capire le stelle ordinarie: basta anzi per estrapolare fino al momento in cui il Big Bang era avvenuto solo un secondo prima. Ma quando cerchiamo di estrapolare ancora più all'indietro nel tempo, raggiungendo fasi più calde e dense – il primo millisecondo, il primo microsecondo, e così via –, le condizioni si fanno sempre più estreme e non possiamo più fidarci della fisica che conosciamo e che possiamo sottoporre a controllo nei nostri laboratori, perché non sappiamo più se essa è adeguata o applicabile in quelle condizioni. (Ci scontriamo con simili indeterminazioni e incertezze, per esempio, anche di fronte ai buchi neri che si trovano nei centri delle galassie.) I "tre numeri cosmici" sono un'eredità dei primissimi stadi. I loro valori, e forse le stesse leggi della fisica, furono "scritti" quando le condizioni dell'universo erano così estreme che la fisica che può descriverle è ancora speculativa.

Nel corso del primo millisecondo ogni cosa era compressa in uno stato più denso di quello di un nucleo atomico, più denso di quello di una stella di neutroni. Le particelle avevano velocità "termiche" casuali molto elevate, a causa della temperatura altissima, e si scontravano ripetutamente l'un l'altra. Il più potente acceleratore di particelle, il Large Hadron Collider (LHC) che viene attualmente costruito presso il CERN di Ginevra da un consorzio di stati europei, sarà in grado di simulare le energie che prevalevano nel nostro universo quando esso aveva 10^{-14} secondi; ma in epoche ancora più primordiali ogni particella del nostro universo trasportava più energia di quanta ne potrà generare persino questa macchina mostruosa.

L'intervallo di tempo fra 10^{-15} e 10^{-14} secondi è stato probabilmente altrettanto ricco di eventi di quello compreso fra 10^{-14} e 10^{-13}, anche se il primo è dieci volte più piccolo del secondo. Lo stesso vale, probabilmente per tutti gli altri intervalli. È dunque più realistico dare lo stesso peso a ogni potenza di 10. In questa prospettiva c'è un sacco di azione anche a stadi sempre più primitivi: anzi, ignorare queste ere sarebbe un grave peccato di omissione.

I fisici teorici stanno cercando di mettere in correlazione le forze che governano il cosmo e quelle del micromondo. Per citare un'altra volta l'*Ottica* di Newton, "le attrazioni della gravità, del magnetismo e dell'elettricità arrivano fino a distanze ben percepibili ed è per questo che sono state osservate anche dall'occhio volgare; ma ce ne possono essere altre che si estendono a distanze così piccole da essere finora sfuggite all'osservazione." Nell'Ottocento Michael Faraday e James Clerk Maxwell mostrarono che le forze elettriche e quelle magnetiche erano legate fra loro e riuscirono a unificarle nell'elettromagnetismo. Rimanevano così due sole forze: la gravità e l'elettromagnetismo. Ma, come oggi sappiamo, a queste se ne dovevano aggiungere due altre che "non potevano essere osservate dall'occhio volgare", perché agiscono solo a cortissimo raggio: l'interazione nucleare forte (che lega insieme protoni e neutroni nei nuclei atomici, sopraffacendo la distruttiva repulsione elettrica fra protoni) e l'interazione debole (importante per il decadimento radioattivo e i neutrini).

I fisici vorrebbero riuscire a scoprire una qualche interrelazione fra tutte e quattro le forze, in modo da interpretarle co-

me manifestazioni diverse di un'unica e sola forza primordiale, allo stesso modo in cui la forza magnetica e quella elettrica risultano legate fra loro. Fu a causa del fatto che non aveva alcuna idea dell'esistenza delle interazioni nucleari forte e debole che Einstein era destinato a fallire negli sforzi cui si sottopose nei suoi ultimi trent'anni di vita, alla ricerca di una teoria unificata.

Il primo passo, nella fisica contemporanea, verso l'unificazione è legato al nome di due grandi nomi della fisica novecentesca, Abdus Salam e Steven Weinberg, che lavorarono indipendentemente basandosi sul lavoro di altri fisici teorici. Salam, che è morto nel 1996, era pakistano (e devoto musulmano). Ha lasciato un'eredità unica (oltre alle sue realizzazioni e intuizioni scientifiche): il Centro Internazionale di Fisica Teorica di Trieste, che fondò e diresse. Il suo intento era rimediare all'isolamento intellettuale dei ricercatori dei paesi in via di sviluppo, riducendo così la spinta all'emigrazione (cui lui stesso aveva dovuto cedere) verso altri paesi. Gli studiosi del Centro hanno la possibilità di passare ogni anno una parte del loro tempo a Trieste, nella stimolante atmosfera di una grande istituzione internazionale.

Abbiamo già citato Weinberg nel capitolo 7. Oltre al suo lavoro specialistico, ha eloquentemente affrontato problemi scientifici generali: il libro che scrisse nel 1977, *I primi tre minuti*, resta il più chiaro compendio dello stato della cosmologia in quel periodo. Weinberg ivi osservava che spesso il progresso viene intralciato perché gli scienziati "non prendono le loro teorie abbastanza sul serio": la storia delle vicende del concetto di Big Bang prima del 1965 (che abbiamo raccontato nel capitolo 3) esemplifica bene questa esitazione. L'attuale vivace esuberanza della cosmologia deve parecchio a incursioni di fisici delle particelle dotati della robusta fiducia intellettuale di Weinberg.

Le interazioni debole e elettromagnetica si fondono a energie molto alte: queste due forze acquisirono un'identità distinta solo quando il nostro universo si raffreddò al di sotto di una certa temperatura critica. Le energie della fisica delle particelle sono misurate in miliardi di elettronvolt o giga elettronvolt (GeV) e l'energia critica per questa unificazione è di circa 100 GeV. Quando il nostro universo aveva 10^{-12} secondi di vita, era così caldo che questa sarebbe stata l'energia tipica delle sue particelle costitutive. Tali livelli di energia sono già stati raggiunti dai grandi acceleratori di particelle e la concezione di Salam e Weinberg di una interazione "elettrodebole" è stata confermata.

La meta successiva è di riuscire a unificare l'interazione elettrodebole con l'interazione nucleare forte e di sviluppare quella che viene detta una teoria di grande unificazione (GUT, *Grand Unified Theory*) di tutte le forze che governano il mondo della *micro*fisica. (Queste teorie di grande unificazione non includono però la gravità, che rappresenta una sfida ancor più dura.) La strada, tuttavia, è intralciata: l'energia critica a cui – si ritiene – dovrebbe verificarsi questa grande unificazione, l'energia che nel caso della teoria di Salam-Weinberg era di 100 GeV, dovrebbe in questo caso essere di 10^{15} GeV: mille miliardi di volte maggiore di quella raggiungibile in un acceleratore. Queste teorie possono essere sottoposte a controllo sperimentale solo se hanno precise conseguenze per il nostro mondo di basse energie. Esse predicono, per esempio, che i protoni non dovrebbero durare in eterno: subirebbero un decadimento molto lento, meno di un atomo all'anno per tonnellata di materia. (Nel lunghissimo periodo, se l'universo continuasse a espandersi, tutti gli atomi finirebbero col dissolversi.)

Se ci basta l'animo per estrapolare la teoria del Big Bang fino ad arrivare a 10^{-36} secondi, scopriamo che allora, ma solo allora e non dopo, le particelle avrebbero avuto abbastanza energia da scontrarsi a 10^{15} GeV. Ma questo acceleratore cosmico chiuse i battenti più di dieci miliardi di anni fa, cosicché non possiamo sapere nulla delle sue attività. A meno che quell'era che durò appena 10^{-36} secondi non ci abbia lasciato alcuni fossili, proprio come la maggior parte dell'elio del nostro universo attuale è un residuo di ciò che avvenne nei suoi primi minuti.

La nostra ignoranza della fisica che ha governato i primissimi istanti dell'espansione cosmica fa il paio con quella della struttura atomica che ostacolava le ricerche, più o meno speculative, su quale fosse la fonte di energia del Sole. Ma c'è una differenza importante. Gli atomi e i nuclei possono essere studiati per mezzo di esperimenti, mentre l'universo primordiale è *il solo luogo* in cui si possono manifestare questi fenomeni a ultra-alta energia. Ciò mette i cosmologi in una relazione simbiotica, più che da parassiti, con i loro colleghi della fisica delle particelle: la cosmologia potrebbe offrire un *input* empirico di importanza cruciale per i più fondamentali problemi della fisica.

Perché materia e non antimateria?

Gli istanti iniziali del Big Bang costituirono una specie di acceleratore "a costo zero". I fisici si avventerebbero entusiasti sulla più insignificante reliquia che fosse sopravvissuta a quella fase primordiale di ultra-energie. Ma le sue tracce potrebbero essere addirittura assai cospicue: tutti gli atomi dell'universo sono essenzialmente dei fossili di uno stadio primordiale, forse tanto primordiale quanto lo possono essere 10^{-36} secondi.

Ci sono circa 10^{80} protoni nell'universo osservabile, ma non sembra che ci siano così tanti antiprotoni. Da dove deriva questa asimmetria? L'universo più semplice, si potrebbe pensare, dovrebbe contenere un ugual numero di particelle e di antiparticelle. Ma è un caso fortunato che il nostro universo non possieda questo particolare tipo di simmetria. Se la possedesse, tutti i protoni si sarebbero annichiliti con gli antiprotoni via via che si andava espandendo e raffreddando; alla fine sarebbe stato pieno di radiazione, ma non avrebbe contenuto né atomi né tantomeno galassie.

In laboratorio si possono creare le antiparticelle facendo scontrare le particelle fra di loro ad altissima velocità (prossima a quella della luce); ma le antiparticelle si annichilano

quando incontrano le particelle ordinarie, convertendo la loro energia (mc^2) in radiazione. In nessun posto della Terra esistono "masse" di antimateria. Essa può sopravvivere solo se viene tenuta in quarantena, isolata dalla materia ordinaria; altrimenti segnala la sua presenza con un'intensa emissione di raggi gamma, che si verifica quando viene annichilita. La nostra Galassia intera è fatta di materia, più che di antimateria. È stata shakerata e rimescolata dai processi di riciclaggio coinvolti nella nascita e nella morte delle stelle (vedi capitolo 1): se fosse stata costituita di materia e antimateria, metà e metà, non sarebbe ormai rimasto nulla. Ma, su scale molto più grandi, non possiamo essere così sicuri. Sarebbe difficile confutare l'affermazione che interi superammassi di galassie sarebbero costituiti alternativamente da materia o da antimateria. E allora, perché il nostro universo (o almeno una sua bella fetta) si mostra così parziale verso un tipo di materia?

Se i protoni non potessero venir creati o distrutti senza che la stessa cosa accada a un egual numero di antiprotoni, allora l'eccesso di protoni – 10^{80} in più, ce ne sono – dovrebbe essere già esistito sin dall'inizio. Sembra un numero innaturalmente grande per accettarlo semplicemente come parte delle "condizioni iniziali".

Andrej Sacharov fu il primo ad affrontare questo tipo di problema. Sacharov, anche se è assai più famoso per altre sue attività, ha dato vari contributi alla cosmologia; in particolare si interessò della fisica esotica dell'universo ultraprimordiale. Nel 1967 enunciò quasi profeticamente tre condizioni che avrebbero dovuto essere soddisfatte se l'universo doveva risultare costituito di materia più che di antimateria:

- La prima è ovvia: la differenza fra il numero di particelle e di antiparticelle non può essere conservata esattamente (il che contrasta, per esempio, con la carica elettrica totale: non può mai apparire una carica positiva senza che appaia anche una carica negativa *esattamente* uguale).
- La seconda è che l'espansione cosmica deve essere così veloce da impedire che si stabilisca un equilibrio completo:

altrimenti, ogni reazione verrebbe esattamente equilibrata dalla sua inversa.

- La terza condizione potrebbe sembrare più difficile da adempiere: le reazioni importanti dovrebbero *non essere esattamente reversibili temporalmente*, di modo che possano "avvertire" la direzione della freccia del tempo scelta dall'espansione cosmica.

Uno dei risultati che i fisici hanno più caro è che tutte le reazioni devono obbedire a una simmetria detta "simmetria TCP". Questo significa che ogni reazione dovrebbe procedere esattamente nello stesso modo in cui procederebbe una reazione "speculare" in cui la direzione del tempo (T) fosse invertita, la carica elettrica (C) fosse rovesciata, e così la destra scambiata con la sinistra (parità, P). Se la simmetria TCP globale è dunque così sacrosanta, allora la T-simmetria può essere violata se (e solo se) viene violata anche la CP-simmetria. Due anni prima che Sacharov pubblicasse le sue idee, Jim Cronin e Val Fitch avevano scoperto, con grande sorpresa generale, che alcune particelle instabili, dette mesoni K, decadevano a volte (per la precisione nello 0,2 per cento dei casi) in modo da violare la CP-simmetria: cosa che implica, assumendo la simmetria TCP, che alcuni processi del micromondo "conoscono" in qualche modo la direzione della freccia del tempo.

I processi scoperti da Fitch e Cronin coinvolgevano solo l'interazione debole. Nessuna teoria che mettesse in relazione l'interazione debole e quella forte esisteva ancora nel 1967; le cosiddette teorie di grande unificazione si svilupparono solo negli ultimi anni Settanta. In queste teorie l'asimmetria temporale (T) si verificherebbe non solo per le interazioni deboli, ma anche per quelle forti, che entrano in gioco nella creazione e nell'annichilazione dei protoni e dei neutroni (i cosiddetti barioni). I criteri enunciati da Sacharov permettono allora che ci sia una lieve preferenza per la creazione di particelle invece che di antiparticelle. Potrebbero essere esistite, per esempio, alcune particelle molto pesanti, dette X, insieme con le loro antiparticelle, le X^1. Quando l'universo si raffreddò al di sotto di 10^{15} GeV, le X e le X^1 sarebbero decadute in quark

e antiquark, le particelle fondamentali di cui sono fatti i barioni e gli antibarioni. Se il prodotto del decadimento di ciascuna delle X^1 fosse l'"anti" preciso del prodotto del decadimento di ciascuna delle X, il risultato sarebbe una perfetta simmetria fra quark e antiquark. Ma uno squilibrio nei processi di decadimento potrebbe portare alla produzione di un po' più di quark che di antiquark, il che in seguito si manifesterebbe come un eccesso di barioni rispetto agli antibarioni.

Si sarebbe potuto così produrre un barione in più ogni 10^9 coppie di barione-antibarione. Col raffreddamento dell'universo gli antibarioni si sarebbero tutti annichiliti con i barioni, producendo fotoni. Ma per ogni miliardo di coppie che si annichilivano, un barione sarebbe sopravvissuto, visto che non poteva trovare un compagno con cui annichilirsi. I fotoni, ormai raffreddati a energie molto basse, costituiscono la radiazione di fondo di 3 gradi Kelvin. In effetti, nell'universo che possiamo osservare, i fotoni sono un miliardo di volte di più dei barioni: 10^{89} fotoni contro 10^{80} barioni. Tutti gli atomi del nostro universo potrebbero dunque risultare da quell'esile inclinazione percentuale a favore della materia e contro l'antimateria, che fu imposta all'universo quando si raffreddò al di sotto di 10^{15} GeV.

I barioni (o i quark che li costituiscono) potevano essere facilmente creati o distrutti dalle energie ultra-alte che dominavano l'universo quando aveva appena 10^{-36} secondi di vita. Il "numero barionico" (il numero dei barioni meno il numero degli antibarioni) *non è* rigidamente conservato: questa non conservazione costituì un prerequisito perché dal Big Bang emergesse la materia, a scapito dell'antimateria. Persino nel nostro universo attuale questi processi di non conservazione permetterebbero ai barioni di decadere. Ma il tasso di decadimento sarebbe quasi impercettibile: non arriverebbe a eliminare più di un atomo dal corpo di una persona nel corso della sua vita. (Il tempo di decadimento dovrebbe essere 10^{15} volte più veloce perché la radioattività dovuta a questo effetto possa costituire un rischio.) Vari gruppi di fisici sperimentali hanno costruito enormi serbatoi d'acqua (nelle viscere della Ter-

ra, per minimizzare gli effetti dovuti ai raggi cosmici e altri disturbi), equipaggiati di strumenti abbastanza sensibili da registrare il decadimento di un atomo di idrogeno in una molecola di H_2O contenuta nel serbatoio. Ma finora non hanno avuto fortuna.[1]

Le teorie di grande unificazione sono ancora in qualche modo provvisorie, ma almeno sono riuscite a far rientrare tutto un nuovo gruppo di problemi – le origini della materia, per esempio – nell'ambito di una discussione seria.

Il rapporto fra la densità dei barioni e quella dei fotoni è un numero cosmico universale, che ha lo stesso valore in ogni parte dell'universo; numeri di questo genere sono il risultato di processi microfisici (collisioni di particelle e annichilazioni) che si verificarono quando il materiale primordiale si espandeva e si raffreddava attraversando un intervallo di temperature critiche. Ma questo, in un certo senso, suscita problemi ancora più fondamentali. Perché, per esempio, le leggi microfisiche hanno incorporata quella lieve asimmetria richiesta dall'idea di Sacharov? La risposta a questa domanda potrebbe trovarsi ancora più indietro nel tempo, al di sotto di 10^{-36} secondi, e comportare energie ancora più grandi di quelle richieste dalla "grande unificazione".

Gravità e unificazione

Le primissime fasi del Big Bang ci costringono a confrontarci con condizioni così estreme che, di sicuro, sappiamo di *non sapere* abbastanza fisica. I due grandi pilastri della fisica del XX secolo sono la teoria dei quanti e la relatività generale. Le strutture concettuali sorrette da questi pilastri sono tuttora disgiunte: in generale i domini cui queste teorie si applicano non si sovrappongono. La gravità è così debole da essere trascurabile su scala molecolare, dove invece gli effetti quantistici sono cruciali. I corpi celesti i cui moti sono governati dalla gravità sono così massicci che gli effetti quantistici possono tranquillamente venir ignorati. Il principio di indeterminazione di Heisenberg ci dice sì che non possiamo misurare contemporaneamente la velocità e la posizione di una particella atomica, ma questa "indeterminazione" è del tutto trascurabile per un pianeta, una stella, una galassia. Ma che succede se estrapoliamo fino allo stadio in cui tutto ciò che oggi possiamo vedere nell'ambito del nostro orizzonte di dieci miliardi di anni luce, era schiacciato e strizzato fino a essere più piccolo di un atomo? A una densità così stupefacente, che si raggiunse nei primi 10^{-43} secondi (tempo questo noto come il "tempo di Planck"), gli effetti quantistici e quelli gravitazionali diventano entrambi importanti. E che succede quando gli effetti quantistici squassano un intero universo?

Dato che manchiamo di una adeguata teoria della *gravità quantistica*, la fisica di cui disponiamo risulta incompleta e insoddisfacente. Alcuni teorici credono che ormai non sia più prematuro esplorare le leggi fisiche che prevalevano a livello del tempo di Planck, e hanno presentato idee affascinanti; ma non c'è però consenso su quali di queste concezioni potranno effettivamente decollare. Una cosa è certa: dobbiamo sbarazzarci del nostro caro senso comune e delle sue nozioni di spazio e tempo; lo spazio-tempo su questa minutissima scala potrebbe essere una specie di struttura caotica, una specie di spuma, priva di una freccia del tempo ben definita; potrebbe anche non esistere alcuna dimensione simile al tempo; microscopici buchi neri potrebbero formarsi e fondersi in continuazione. L'attività potrebbe essere così violenta da generare nuovi domini spazio-temporali che si evolverebbero in altrettanti universi separati.

Eventi successivi (in special modo la fase dell'"inflazione" cosmica, di cui parleremo nel prossimo capitolo) potrebbero aver cancellato tutte le tracce dell'era quantistica iniziale. E l'unica altra arena in cui gli effetti della gravità quantistica potrebbero dar mostra di sé si trova nelle vicinanze della singolarità centrale di un buco nero, da cui nessun segnale può sfuggire. È duro controllare una teoria che non manifesta conseguenze se non in questi esotici e inaccessibili domini. Per poterla prendere sul serio essa dovrebbe o venir immersa

in una qualche teoria onnicomprensiva che possa essere controllata in molti altri modi, o dovrebbe venir concepita come totalmente inevitabile: una campanella di verità che squilla così forte da costringere assenti e ritardatari.

L'approccio che offre le migliori speranze di unificare tutte le quattro forze fondamentali è la teoria delle "superstringhe". Secondo questa concezione del mondo, le entità fondamentali assomigliano a stringhe monodimensionali, piuttosto che a punti o a particelle. Tali stringhe possono vibrare secondo varie armoniche, e le varie particelle corrispondono a specifici modi di vibrazione. Le stringhe sono piccole. Sono 10^{20} volte più piccole di un nucleo atomico: più piccole di un nucleo atomico dello stesso fattore per cui un nucleo atomico è più piccolo di noi.

La più promettente di tutte le teorie delle superstringhe richiede 10 dimensioni. Non ci accorgiamo delle dimensioni in più perché esse sarebbero state compattificate: un po' come un foglio di carta, una superficie bidimensionale, che può sembrare una linea a una sola dimensione se viene arrotolato molto strettamente. Ogni "punto" dello spazio cui siamo abituati ha, in effetti, sei dimensioni di struttura interna. Il fascino della teoria delle superstringhe consiste nel fatto che essa può spiegare non solo le particelle fondamentali, ma anche le proprietà dello spazio. La teoria della relatività generale, che interpreta la gravità come la curvatura dello spazio-tempo quadridimensionale, è incorporata intrinsecamente nella teoria: il quanto di gravità, o gravitone, è il modo più semplice con cui può vibrare un laccio formato da una superstringa.

La sfida attuale è quella di capire perché lo spazio a dieci dimensioni "si compatti" nel nostro comune spazio quadridimensionale (il tempo, più tre dimensioni spaziali) invece che in tre o in cinque dimensioni; e anche di riuscire a cogliere quel modo, unico, in cui ciò è avvenuto. C'è ancora un abisso, non attraversato da ponti, fra la teoria delle superstringhe 10-dimensionale e i fenomeni osservabili. La teoria delle superstringhe pone problemi che sono ancora troppo difficili perché i matematici riescano a rispondervi. Da questo punto di

vista essa differisce dalla maggior parte delle teorie fisiche: usualmente, la matematica che faceva al caso era già stata sviluppata prima di loro. Einstein, per esempio, utilizzò concezioni geometriche che si erano venute affermando nel XIX secolo, e non dovette affatto creare dal nulla la matematica di cui aveva bisogno.

Il fisico Eugene Wigner ha scritto un famoso articolo dal titolo "L'irragionevole efficacia della matematica nelle scienze fisiche". È di fatto assai notevole che il mondo esterno esibisca così tante configurazioni che la nostra mente può interpretare in linguaggio matematico – specialmente quando queste caratteristiche sono così remote dal mondo delle esperienze e dei fenomeni quotidiani per affrontare i quali i nostri cervelli si sono evoluti. Edward Witten, il teorico più in vista delle superstringhe, descrive l'idea come "un pezzo di fisica del XXI secolo finita per sbaglio nel XX". Ma sarà un risultato davvero notevole se gli esseri umani, di qualsivoglia secolo, potranno mai sviluppare una teoria "finale" e onnicomprensiva come pretende di poter essere quella delle superstringhe.

Storia cosmica. Parte Prima, Seconda e Terza

La storia del nostro universo si divide in tre parti:

– Il primo millisecondo, un'era breve, ma piena di eventi, che occupa 40 potenze di 10 nel tempo, iniziando al tempo di Planck: 10^{-43} secondi. È questo l'*habitat* intellettuale dei fisici matematici e dei cosmologi quantistici. La fisica rilevante per quest'epoca è ancora speculativa; anzi, uno dei motivi che rendono importante lo studio della cosmologia è che l'universo primordiale può offrire i soli indizi reali per capire le leggi di natura a quelle estreme energie.

– Il secondo stadio si estende dalla fine del primo millisecondo fino a un milione di anni circa (e occupa solo 16 potenze di dieci). È un'era in cui il cauto empirista si sente più a suo agio. Le densità sono ben al di sotto di quelle nucleari ma ogni cosa si sta ancora espandendo in modo del tutto unifor-

me. Ci sono buoni riscontri quantitativi (le proporzioni dell'elio e del deuterio cosmici, la radiazione di fondo e così via, descritte nel capitolo 3) e la sua fisica è ben sperimentata in laboratorio. La Parte Seconda della storia del cosmo, anche se giace nel remoto passato, è quella più facile da capire.

– Ma rimane così ben trattabile solo fintanto che l'universo rimane amorfo e privo di struttura. Quando le prime strutture tenute insieme dalla gravità cominciano a condensarsi – quando le prime stelle, le prime galassie, i primi quasar si sono formati e hanno cominciato a brillare – comincia l'era studiata dagli astronomi tradizionali. Ci troviamo qui a osservare manifestazioni complesse di leggi fondamentali ben note. La Parte Terza della storia cosmica è difficile per lo stesso motivo che rende difficile lo studio di tutte le scienze ambientali, dalla meteorologia all'ecologia: esse comportano lo studio di manifestazioni ultracomplesse di leggi semplici.

La cosmologia ci pone di fronte a due stili contrastanti di problemi. La prima evoluzione del nostro universo (Parte Prima e Seconda), quando ogni cosa si espandeva quasi uniformemente e nessuna struttura si era ancora condensata, può venir descritta da una manciata di numeri, allo stesso modo della fisica delle particelle subatomiche. Ma la genesi di una galassia come la nostra Via Lattea fa entrare in gioco la dinamica dei gas, i processi della formazione stellare, gli effetti di retroazione fra stelle e supernove. Per comprendere questi processi delicati e "disordinati", per capire le complessità che vediamo tutt'intorno a noi e di cui noi stessi siamo parte, occorre un approccio diverso. Tanto diverso, per dirla col teorico della relatività Werner Israel, quanto è diversa la lotta libera dagli scacchi.

La teoria dell'evoluzione delle galassie non sarà mai così "pulita" come quelle teorie, precise come una partita di scacchi, cui aspirano i fisici delle particelle. Assomiglierà piuttosto a una buona teoria geofisica. Per esempio, la deriva dei continenti, o la teoria della tettonica a placche, rappresenta un'idea unificante che ci fa cogliere e capire più a fondo fatti che prima rimanevano del tutto scollegati, ma non la si deve svilire

nel discredito perché non può predire l'esatta forma dei continenti.

Cosa significherebbe una teoria finale?

L'universo ultraprimordiale potrà forse un giorno venir sussunto trionfalmente in una qualche teoria che copra con il suo arco tutta l'estensione del tempo, dal tempo di Planck, 10^{-43} secondi, in avanti. In effetti alcuni fisici già oggi pretendono che il nostro universo si sia evoluto essenzialmente dal nulla. Ma dovrebbero misurare le parole, specie quando si rivolgono ai filosofi. Il "vuoto" dei fisici è un costrutto intellettuale assai più ricco del "nulla" dei filosofi: in esso sono latenti tutte le particelle e tutti i campi descritti dalle equazioni della fisica. In ogni modo, pretese simili non risolvono il problema filosofico del perché *ci sia* un universo. Come scrive Stephen Hawking: "Che cos'è che insuffla il fuoco dell'esistenza nelle nostre equazioni? [...] Perché mai l'universo si dà la pena di esistere?"

Né una tale teoria fondamentale ci potrebbe aiutare a districare le complessità delle epoche successive dell'evoluzione cosmica. Possiamo benissimo essere "riduzionisti" che credono che le complessità della chimica e della biologia possano essere in linea di principio ridotte alla fisica e che persino i più elaborati assembramenti di atomi siano governati dall'equazione di Schrödinger. Ma quell'equazione non può venir risolta praticamente per alcunché di più complicato di una molecola. Le scienze si ordinano secondo una gerarchia di complessità, partendo dalla fisica delle particelle, passando attraverso la chimica e la biologia cellulare, fino alla psicologia e all'ecologia. Ma ciascuna di esse è autonoma, in tanto e in quanto dipende da un suo sistema concettuale che non può venir ridotto e analizzato in termini di qualcosa di più semplice.

Per capire le turbolenze di un flusso d'acqua, un problema arduo e tuttora irrisolto, occorre pensare in termini di umidità, mulinelli, vortici e così via. Non serve a nulla risolvere

l'acqua nei suoi "atomi", anzi: se ne cancellerebbero tutte le caratteristiche distintive. E – per fare un altro esempio – ciò che avviene in un calcolatore può certo essere descritto in termini elettrici, ma così facendo se ne perde l'essenza, la logica codificata in quei segnali. Non siamo in grado di risolvere l'equazione di Schrödinger nemmeno per il più infimo organismo biologico, ma anche se lo fossimo ciò non ci darebbe una sua descrizione economica o un'intuizione che ci aiuti a comprenderlo. Il modo di comportamento dei sistemi complessi potrà anche essere riducibile alla fisica, ma come essi si comportino effettivamente non può venir ricostruito dalle equazioni fondamentali della fisica. Le scienze sono collegate insieme, ma non in una gerarchia la cui intera sovrastruttura è messa a rischio da fondamenta pericolanti e ancora incerte.

C'è però un senso, anche se piuttosto ristretto, in cui certe scienze possono pretendere di essere "le più fondamentali". Le catene causali (quando continuate a chiedere perché? e perché? e perché?) conducono a problemi della fisica delle particelle o della cosmologia. È per questo motivo (come ha sottolineato in modo particolare Steven Weinberg) che i progressi in questi campi dischiuderanno sicuramente aspetti profondi della realtà. Ed è per questo che li studiamo, ma non perché le altre scienze dipendano da loro.

Una delle metafore favorite di Richard Feynman ritrae bene queste limitazioni. Supponete di non conoscere gli scacchi. Allora, solo osservando il gioco, potrete gradualmente indovinarne le regole. Analogamente, i fisici scoprono configurazioni nel mondo della natura e imparano la dinamica e le trasformazioni che governano i suoi elementi fondamentali. Ma, negli scacchi, imparare come si muovono i pezzi è solo un preliminare banale per poter imboccare la faticosa strada che porta il novizio a diventare un grande maestro. Tutto il fascino del gioco sta nella varietà implicita in poche semplici regole. Allo stesso modo, tutto ciò che è accaduto nell'universo negli ultimi dieci miliardi di anni – la nascita delle galassie e delle stelle, l'intricata evoluzione che almeno su un pianeta ha portato all'apparizione di creature capaci di interrogarsi su que-

sta storia cosmica – può forse essere implicitamente contenuto in poche semplici equazioni fondamentali. Ma l'esplorazione della complessità ci lancia una sfida senza fine, una sfida che è appena cominciata.

NOTE

1. Questi esperimenti non sono stati, però, un fiasco totale. Essi hanno avuto un risultato positivo del tutto inatteso, come abbiamo visto nel capitolo 6, quando, grazie a essi, furono scoperti i neutrini della supernova 1987A. Altri esperimenti, effettuati negli stessi laboratori sotterranei, potrebbero anche portare alla rilevazione delle particelle che costituiscono la materia oscura.

10

L'INFLAZIONE E IL MULTIVERSO

E mi mostrò dell'altro, una cosettina grande quanto una noce e tonda come una palla, che stava sul palmo della mia mano. La guardai pensieroso, chiedendomi "Che cos'è questo?". E la risposta mi giunse: "È tutto ciò che è stato creato". Mi meravigliai che continuasse a esistere e non si disintegrasse all'improvviso, tanto era piccola.

JULIAN DI NORWICH (circa 1400)

I problemi della "piattezza" e dell'"orizzonte"

Un universo si può espandere per sempre o può finire col collassare di nuovo. Fino a che non sapremo qual è precisamente il valore di omega non conosceremo il destino finale del nostro. Queste due predizioni a lungo termine – espansione eterna o collasso in un Big Crunch – sembrano molto diverse. Ma se estrapoliamo nel passato ci troviamo di fronte a un altro rompicapo: i punti di partenza che potrebbero aver condotto a qualcosa di simile al nostro universo sono di fatto molto ristretti, molto speciali, al confronto della gamma di universi in espansione che possiamo immaginare.

Il nostro universo si sta ancora espandendo dopo dieci miliardi di anni. Altri universi sarebbero collassati prima, non dando alle stelle abbastanza tempo per evolversi. In effetti, se un universo collassasse nell'arco di un milione di anni, non avrebbe mai il tempo per raffreddarsi al di sotto di una temperatura di 3000 gradi: per tutta la durata della sua vita non

sarebbe altro che una palla di fuoco opaca, in cui tutto si trova alla stessa temperatura. Un'espansione iniziale appena *più lenta* avrebbe portato a un universo molto diverso dal nostro. E lo stesso effetto avrebbe avuto un'espansione *troppo veloce*: l'energia dell'espansione avrebbe sopraffatto la gravità e le galassie non sarebbero mai state in grado di condensarsi. (Nonostante la sua indeterminazione, omega non è poi così più piccolo di 1.) In termini newtoniani, le energie cinetica e potenziale iniziali devono essere state accoppiate con molta precisione. È come se stessimo nel fondo di un pozzo e lanciassimo una pietra in alto facendola arrivare a fermarsi *esattamente* all'imboccatura.

È un mistero di quelli fondamentali perché il nostro universo stia ancora – dopo 10^{10} anni – espandendosi con un valore di omega non troppo discosto da uno. C'è da stupirsi che non sia collassato molto tempo fa, che non si stia espandendo così velocemente che la sua energia cinetica sorpassi gli effetti della gravità di molte potenze di 10. Il nostro universo deve aver ricevuto una spinta iniziale assai ben regolata, esattamente quella sufficiente per equilibrare la tendenza deceleratrice della gravità, per trovarsi oggi nello stato in cui appunto si trova. Questo problema è detto il *problema della piattezza*.

Correlato a esso c'è il *problema dell'orizzonte*, che lascia ancora più perplessi. Perché l'universo si sta espandendo in modo così uniforme e simmetrico? Sembrerebbe che a un universo scompigliatamente disomogeneo e anisotropo si schiudano molte più opzioni che al nostro. E allora, perché tutte le sue parti si sincronizzarono per cominciare a espandersi tutte nello stesso modo speciale, obbedendo alla stessa dinamica? Se alcune regioni remote fossero partite in modo diverso dalle altre, sembrerebbe che in qualche modo le deviazioni drastiche dall'uniformità siano state allisciate tutte, tutte spazzate via.

A prima vista sembrerebbe non esserci qui alcun problema: quando ogni cosa era in strettissimo contatto con ogni altra cosa, non sarebbe forse stato più facile che onde di pressione e altri fenomeni simili abbiano omogeneizzato il nostro

universo? Ma, di fatto, il contatto casuale era *peggiore*, e non migliore quando tutto era estremamente compresso. Infatti, se è vero che le distanze erano ridottissime nell'universo primordiale, ancora più ridotte erano le scale temporali.

Questo problema di comunicazione nell'universo primordiale può forse venir chiarito da un esempio, utilizzando numeri effettivi. Immaginiamo una galassia che si trovi ora a un miliardo di anni luce da noi. Il nostro universo si sta espandendo da 10-20 miliardi di anni, cosicché ci sarebbe il tempo di scambiare fra i 10 e i 20 segnali nel corso dell'attuale tempo di Hubble. Quando il nostro universo era mille volte più compresso e la temperatura di fondo, invece di essere di 2,7 era di 3000 gradi Kelvin, questa galassia (che all'epoca sarebbe ovviamente stata una protogalassia) sarebbe stata 1000 volte più vicina, a una distanza di solo un milione di anni luce, invece che un miliardo. Se le galassie si stessero allontanando reciprocamente a una velocità *costante*, il nostro universo sarebbe allora stato 1000 volte più giovane. Si sarebbe potuto scambiare lo stesso numero di 10-20 segnali perché, anche se ogni segnale avrebbe avuto 1000 volte meno strada da fare, il tempo disponibile (il tempo di Hubble) si sarebbe accorciato dello stesso fattore. Ma la gravità rallenta l'espansione. Quando il nostro universo era 1000 volte più compresso di ora, era in effetti *più di 10.000 volte più giovane*. Così, in quell'era primordiale, si sarebbe potuto scambiare un solo segnale (e forse nemmeno quello).

Era dunque *più difficile* scambiare segnali luminosi nel passato di quanto lo sia ora; e niente – nessuna onda di pressione, nessun altro effetto omogeneizzante – può viaggiare più veloce della luce. E allora perché, quando osserviamo regioni remotissime poste in direzioni opposte, esse ci appaiono così simili e sincronizzate? Perché la temperatura misurata dal satellite COBE è quasi la stessa in tutto il cielo?

Una prima fase di accelerazione

Il problema dell'orizzonte salta fuori perché la gravità *rallenta* l'espansione cosmica: quando il nostro universo era più giovane e più compresso, si espandeva più velocemente e c'era quindi meno tempo per trasmettere segnali o per stabilire contatti casuali. Il problema sarebbe risolto se l'universo nei suoi primissimi momenti avesse attraversato una fase *accelerata* di espansione esponenziale. In un universo accelerato il contatto casuale sarebbe stato favorito nei suoi momenti primordiali, cosicché parti oggi remotamente separate del nostro universo avrebbero potuto sincronizzarsi e coordinarsi fra loro prima di separarsi accelerando.

Secondo questa teoria *inflazionaria* il motivo per cui il nostro universo è così grande e per cui la gravità e l'espansione sono così bene equilibrate, deve essere ricercato in qualcosa di molto notevole, che accadde durante i primi 10^{-36} secondi, quando il nostro intero universo osservabile aveva le dimensioni di una palla da golf. Da quel momento in poi l'espansione del cosmo è andata *decelerando* a causa dell'attrazione gravitazionale che ogni parte dell'universo esercita su tutte le altre. Ma i fisici teorici presentano ragioni serie (per quanto, è ovvio, ancora provvisorie) perché, con le colossali densità che precedettero quel momento, durante i primi 10^{-36} secondi, potesse entrare in gioco un nuovo tipo di "repulsione cosmica" che avrebbe potuto sopraffare la gravità "ordinaria". In quei tempi precocissimi l'espansione sarebbe andata *accelerando* esponenzialmente, di modo che si sarebbe potuto gonfiare un universo-embrione, omogeneizzato e dotato di quell'equilibrio finemente sintonizzato fra energia cinetica e gravitazionale.

La repulsione si verificò perché lo spazio stesso in quell'era iniziale era molto diverso da oggi. Prima che le forze nucleari e quella elettromagnetica acquisissero le loro identità separate, lo spazio privo di oggetti (ciò che i fisici chiamano il "vuoto") avrebbe avuto, latente in sé, un'enorme riserva di energia; ma questa forma di energia aveva l'apparentemente perversa proprietà di creare una pressione *negativa*: in altre parole, lo spazio possedeva una tensione.[1]

Secondo le equazioni di Einstein un'energia positiva del vuoto causerebbe una "repulsione cosmica": l'espansione universale accelererebbe. Il che è del tutto opposto a ciò che succede quando la stessa energia assume forme più familiari. Secondo la teoria dell'inflazione l'universo ultraprimordiale attraversò una fase in cui l'energia del vuoto era enorme e l'espansione cosmica fu, di conseguenza, paurosamente rapida. Questa inflazione ebbe fine quando il vuoto decadde in uno stato più comune. Questa transizione libera calore, un po' come l'acqua libera "calore latente" quando congela;[2] e questo calore sopravvive, ormai raffreddato e diluito, sotto forma di radiazione di fondo a 2,7 gradi.

Quest'idea, veramente notevole, fu proposta da Alan Guth, un fisico americano la cui prima incursione nel campo della cosmologia portò a una "messinscena spettacolare" (per citare la descrizione che Guth stesso diede della sua intuizione). Ciò che fece fu di specificare chiaramente perché avrebbe potuto esserci una prima fase di espansione accelerata e come ciò possa condurre a un universo grande e uniforme come quello che vediamo intorno a noi. C'erano state varie premonizioni di queste sue ipotesi. Ricordo, per esempio, una conferenza tenuta durante una scuola estiva dal teorico belga François Englert, in cui si discuteva di un universo che crescesse esponenzialmente. Allora non apprezzai, certo, quanto radicale e importante potesse essere il suggerimento di Englert, e mi consola il fatto che il resto dell'uditorio sembrò altrettanto poco stimolato. E c'erano stati altri articoli preveggenti, per esempio quelli di Aleksandr Starobinskij in Unione Sovietica, di Richard Gott negli Stati Uniti e di Katsuoko Sato in Giappone.

La scoperta della radiazione di fondo a microonde – il più importante sviluppo della cosmologia osservativa dai tempi di Hubble in poi – fu preceduta da vari articoli, indipendenti fra loro, che rimasero poco letti o fraintesi (vedi capitolo 3).

La stessa cosa avviene, a volte, anche per le innovazioni teoriche.[3]

La proposta originaria di Guth su come "innescare" e poi far cessare l'inflazione andò a sbattere contro vari intoppi. In effetti, i meccanismi dell'inflazione sono tuttora speculativi, perché dipendono dalla fisica delle altissime energie che è quasi completamente sconosciuta. Ma l'idea generale mantiene un'attrattiva cui difficilmente si può sfuggire. Sembra infatti risolvere e il problema della piattezza e quello dell'orizzonte. Anzi, suggerisce una risposta al problema del *perché* l'universo si espande – fatto che altrimenti sembrerebbe dover far parte delle "condizioni iniziali". Prima di questa teoria l'uniformità dell'universo sembrava un mistero e non si riusciva a trovare una ragione perché l'universo si dovesse essere gonfiato fino alle sue dimensioni osservate. Ma nel corso della fase inflazionaria l'universo riceve una spinta verso l'esterno sufficiente a sostenere la sua espansione. Guth, anzi, trovava più difficile da capire come l'inflazione avesse mai potuto *arrestarsi*, problema che divenne poi noto come il problema della "uscita garbata" dalla fase inflazionaria.

L'idea di inflazione ha ormai più di quindici anni. Non c'è ancora consenso sul legame fra una specifica teoria unificata e la meccanica dell'inflazione. Ma i cosmologi possono inferire qualcosa a proposito delle leggi fisiche che prevalsero nei primi 10^{-36} secondi della storia del nostro universo: come minimo, possiamo eliminare varie possibilità che condurrebbero a un mondo molto diverso dal nostro.

Può sembrare controintuitivo che un universo intero, che si estende per almeno dieci miliardi di anni luce (e probabilmente assai più lontano, oltre il nostro orizzonte), possa essere emerso da un puntolino infinitesimale. Ciò che rende possibile questo è che, per quanta inflazione possa verificarsi, l'energia totale netta è nulla. È come se l'universo stesse scavandosi da solo un "pozzo gravitazionale" così profondo che ogni cosa che si trova in esso ha un'energia gravitazionale negativa esattamente uguale all'energia della sua massa a riposo mc^2. Rendersi conto di questo rende più facile inghiottire il

concetto che il nostro intero universo sarebbe emerso praticamente dal nulla.[4]

Le fluttuazioni: quanto vale Q?

L'inflazione può "distendere" [*stretch*] un universo sino a renderlo "piatto" e può spiegare la sua vasta scala. Ma può dar conto anche di Q, il "numero magico", il cui valore di 10^{-5} caratterizza l'energia delle increspature o fluttuazioni da cui si sono formate le strutture cosmiche? (Vedi capitolo 7.) Quando l'inflazione era ancora un concetto nuovo, nel lontano 1982, i *guru* della teoria si diedero convegno a Cambridge. Passarono tre settimane a discuterne e a cercare di sviluppare l'idea. Il dibattito si focalizzò sulle fluttuazioni: il risultato inizialmente fu deludente, perché il valore più naturale per Q sembrava dover essere 1, invece che un numero piccolo come 10^{-5}.

Le fluttuazioni da cui si sono formati gli ammassi e i superammassi, e anche quelle più grandi la cui diffusione nel cielo è stata ora registrata da COBE, sono il risultato di processi quantistici microscopici verificatisi in epoca antichissima, quando l'universo era strizzato dentro il volume di una palla da golf. Oggi capiamo come Q dipenda dai dettagli dell'inflazione: possiamo selezionare specifiche ipotesi riguardanti la fisica di quella fase, elaborarle matematicamente e vedere, per ogni ipotesi, a cosa dovrebbero assomigliare le increspature. Confrontando il risultato di questi calcoli con le osservazioni, possiamo almeno restringere la gamma delle teorie fisiche sostenibili. La cifra reale, 10^{-5}, non ha ancor oggi, tuttavia, trovato alcuna spiegazione naturale.

Rilevando la posizione di ammassi e superammassi, sondando la radiazione di fondo, gli osservatori stanno confrontandosi con l'era inflazionaria dell'espansione cosmica (che durò 10^{-36} secondi) utilizzando *veri e propri controlli empirici*, esattamente come possiamo – già ora – studiare le condizioni fisiche dell'universo nel corso dei suoi primi secondi analiz-

zando le percentuali di elio e di deuterio presenti oggi nel cosmo. C'è un'interazione fra teorie ben definite (per quanto ancora speculative) e i dati che possono stabilire delle limitazioni per loro: in questo senso le teorie inflazionarie fanno pienamente parte del contesto della scienza seria.

Lo status dell'inflazione

Nelle prime varianti della teoria dell'universo inflazionario (quelle più semplici da visualizzare) tutto iniziava con un semplice "bang", seguito da un interludio inflativo che "distende" [*stretches*] l'universo in tutte le direzioni, così da risolvere il cosiddetto problema della piattezza. Il che richiede che il fattore di inflazione sia almeno 10^{30}. Tuttavia, questo fattore è probabilmente di gran lunga più grande: una piccola regione iniziale verrebbe allora allungata e stirata non solo fino all'orizzonte che presentemente possiamo osservare, ma molto di più ancora. Il nostro universo sarebbe dunque destinato a espandersi per molto più tempo di quanto non abbia già fatto; la sua densità attuale sarebbe di conseguenza molto vicina al valore critico che segna la linea di demarcazione fra universi che si espandono per sempre e universi che collassano. La maggior parte delle versioni della teoria dell'inflazione predicono così che la quantità che i cosmologi denotano con Ω dovrebbe essere *quasi esattamente* uguale a 1. Il nostro universo si estende ben al di là del nostro attuale orizzonte di 10-20 miliardi di anni luce; molte altre galassie diventeranno visibili via via che continuerà a espandersi. Potrà anche finire per collassare nuovamente, ma solo dopo essersi allargato di un ulteriore fattore pari a $10^{1.000.000}$.

La maggior parte dei teorici, specialmente coloro che sono approdati alla cosmologia con una formazione in fisica delle alte energie, considera l'inflazione come un'idea affascinante, che offre una visione – cui è difficile sottrarsi – del perché l'universo abbia le proprietà che lo caratterizzano. Ma alcuni di loro ne sono meno ammaliati, in particolare quelli che preferiscono un approccio più geometrico. Il più famoso di questi è Roger Penrose: per lui l'inflazione è "una moda che i fisici teorici hanno imposto alla cosmologia" e ricorda che "ogni scarrafone è bello a mamma sua". Nonostante tali voci discordanti, e alcune idee innovative che si sono sviluppate lungo linee alternative, la maggior parte delle teorizzazioni sull'universo ultraprimordiale incorpora il concetto di inflazione.

Il concetto ha figliato varianti mutanti; e alcune di queste varianti suggeriscono che gli universi possano comportarsi tutti allo stesso modo. Il cosmologo russo Andrej Linde sostiene l'idea di un'"inflazione caotica": uno scenario più complesso in cui l'intero universo (il "multiverso", nella terminologia che ho qui adottato) possa essere infinito ed eterno, ma generi in continuazione regioni gonfiate dall'inflazione che si evolvono in universi separati.[5] Ciò che chiamiamo il nostro universo potrebbe non essere altro che un dominio di un eterno ciclo riproduttivo degli universi. Questi altri universi sono oggi sconnessi dal nostro, ma possono essere fatti risalire a un antenato comune. Il Big Bang che diede origine al nostro universo sarebbe solo un evento verificatosi nel corpo di una struttura assai più grande. All'inizio degli anni Settanta Sacharov propose qualcosa di simile: lo chiamava l'universo "multistrato". Ma idee del genere sono diventate più concrete nel contesto delle concezioni inflazionarie.

Verso altri universi

Tutte le forze fondamentali che governano il nostro universo – la gravità, le interazioni nucleari, la forza elettromagnetica – sono aspetti differenti di un'unica forza primeva. Le transizioni che si verificano nelle proprietà dello spazio, del *vuoto*, col raffreddarsi di un universo, differenziano le forze e stabiliscono le masse delle particelle elementari. Fu probabilmente una transizione di questo tipo che pose termine all'era dell'inflazione che aveva allisciato delle "pezze" abbastanza grandi da poter diventare un universo simile al nostro.

Questi cambiamenti del vuoto sono simili alle transizioni di fase che si verificano passando dallo stato gassoso a quello liquido, o da quello liquido a quello solido, e così via, quando i materiali ordinari vengono raffreddati. La loro impronta iniziale può essere arbitraria o accidentale, come le figure che si formano nel ghiaccio di uno stagno. (Si può fare un'analogia anche col comportamento di un normale magnete: ad alte temperature il magnetismo scompare perché gli atomi sono talmente agitati termicamente che si orientano in modo casuale; ma quando una sostanza magnetica viene raffreddata al di sotto di una certa temperatura specifica, detta punto di Curie, gli atomi "si allineano" spontaneamente, ma in una direzione che è in genere imprevedibile.) Altri universi, o altri domini interni a un universo infinito, possono essersi raffreddati in modo diverso, addirittura finendo con l'essere governati da differenti leggi.

Lo spazio reale non è divisibile all'infinito. Solo 40 potenze di 10 ci fanno scendere dalla scala terrestre a quella di Planck, la lunghezza più piccola permessa dall'indeterminazione quantistica alla fabbrica dello spazio. Il nostro attuale raggio di Hubble, che stabilisce l'orizzonte di qualsiasi osservazione, è solo 40 potenze di 10 al di sopra della scala atomica. Ma non c'è una limitazione *superiore* alle dimensioni che potranno finire con l'apparire: al di là dell'attuale raggio di Hubble potrebbero trovarsi strati su strati di strutture sempre più grandi. La nostra parte di universo potrà anche essere destinata a collassare dopo, diciamo, $10^{100.000}$ anni – un 1 seguito da centomila zeri, invece che un 1 seguito da appena 10 zeri che è la sua età attuale. I gradini che portano dall'attuale raggio di Hubble fino alla scala globale del nostro universo potrebbero essere molti di più di quelli che ci fanno risalire da una particella elementare fino al raggio di Hubble. La luce che ci arriverà, nel futuro lontano, da regioni assai al di là del nostro orizzonte presente, potrebbe rivelare che occupiamo una chiazza – fors'anche atipica – immersa in una struttura più grande e vasta. Potremmo addirittura scoprire, per esempio,

che abitiamo in un universo finito, in un universo-isola, i cui confini potrebbero anche diventare un giorno visibili.

Anche un universo che collassi dopo aver percorso un grande ciclo cosmico potrebbe non essere affatto la realtà tutta intera; nella più ampia prospettiva del multiverso, esso rappresenterebbe solo "un episodio", un dominio. Un multiverso in perenne inflazione potrebbe far germogliare domini separati; e le leggi della fisica potrebbero variare fra un universo e l'altro. Inoltre, all'interno di ogni buco nero che collassa potrebbero trovarsi i semi di un nuovo universo in espansione.

L'insieme, il multiverso, potrebbe abbracciare universi governati da leggi differenti e diverse forze fondamentali, e contenere tipi diversi di particelle. Gli universi non vivrebbero tutti ugualmente a lungo, né avrebbero storie ugualmente dense di avvenimenti: alcuni, come il nostro, potrebbero espandersi per tempi assai più lunghi di dieci miliardi di anni; altri potrebbero essere dei nati-morti, o perché ricollassano dopo una breve esistenza, o perché le leggi fisiche che li governano non sono abbastanza ricche da permettere conseguenze complesse. L'ampiezza delle increspature, il Q degli altri universi, potrebbe essere molto più grande, o più piccolo che nel nostro. In alcuni di essi persino lo spazio stesso potrebbe avere un differente numero di dimensioni.

Solo alcuni universi (e il nostro, ovviamente, fra questi) finirebbero con l'essere luoghi propizi per la complessità e l'evoluzione. Questa visione, letteralmente infinita, del cosmo è cruciale per i ragionamenti antropici di cui discuteremo nei capitoli 14 e 15. Gli altri universi non sono direttamente osservabili, ma il loro status concettuale non è per questo peggiore di quello delle superstringhe, o anche dei più familiari quark: anch'essi sono costrutti teorici inosservabili le cui manifestazioni ci aiutano a dar conto del modo in cui è fatto il mondo.

Il nostro universo sembra uniforme semplicemente perché il nostro attuale orizzonte delle osservazioni è piccolissimo in rapporto alle scale caratteristiche del multiverso. Ma potreb-

be essere "speciale". È chiaro che non ci troviamo in un punto scelto a caso nello spazio: siamo su un pianeta riscaldato da una stella. La cosa non ci sorprende: non vorremo sostenere che sarebbe più "tipico" se ci trovassimo isolati nello spazio intergalattico. Similmente, la nostra "casa-universo" deve essere speciale – per ciò che contiene, e per le leggi e le forze che la governano – se la vita si è potuta sviluppare nel suo seno. È questo, però, un concetto che possiamo meglio intendere rendendoci conto che il nostro mondo è solo un'isola di un arcipelago cosmico.

I primi cartografi speculavano sui continenti che dovevano trovarsi oltre le frontiere del mondo allora conosciuto, e sui draghi e i leoni che popolavano quella *terra incognita*. I domini che non possiamo osservare sembrerebbero avere uno status concettuale simile, altrettanto fragile. Ma esso ci è additato da alcune teorie ormai ben sviluppate: e queste, comunque, ci permettono di avere almeno un'idea dei draghi che si annidano al di là dei nostri cosmici orizzonti.

NOTE

1. Il perché della tensione può essere chiarito con un argomento molto semplice. Si consideri un barattolo vuoto: ma vuoto per davvero, che contenga solo il "vuoto" di cui stiamo parlando. Il barattolo sia sigillato con un pistone e supponiamo di tirare il pistone verso l'esterno del barattolo, che conterrà ora più vuoto di prima. Se il vuoto possiede energia, il contenuto del barattolo avrà *aumentato* la sua energia. È tutto il contrario di ciò che succede quando il barattolo contiene del gas caldo: il gas diventa più rarefatto e si espande. E si *raffredda*, anche; l'energia termica viene infatti convertita nel lavoro fatto dalla pressione che spinge il pistone. Il vuoto deve dunque esercitare una "pressione negativa" sul pistone. Si tratta, ovviamente, di un'analogia incompleta. Lo spazio non può essere confinato in un barattolo: solo l'espansione di un intero universo può effettivamente far cambiare la quantità di energia del vuoto.

2. L'*input* di energia proveniente dal "decadimento del vuoto" potrebbe aver reso l'universo abbastanza caldo perché avessero luogo i processi che abbiamo discusso nel capitolo 9 – la creazione di un eccesso di materia rispetto all'antimateria.

3. Di fatto, non è una coincidenza che l'idea di inflazione sia venuta fuori intorno al 1980 e non molto tempo prima. Era in quegli anni che venivano immaginate teorie di grande unificazione in cui i barioni non venivano esattamente conservati: queste teorie davano corpo allo schema di Sacharov su come generare un eccesso di materia rispetto all'antimateria. Se il numero dei barioni fosse strettamente conservato, allora le 10^{80} particelle che osserviamo oggi avrebbero dovuto esistere fin dal tempo $t = 0$; sarebbe difficile capire come ogni cosa avrebbe potuto gonfiarsi partendo da un volume infinitesimale se quel vasto numero di particelle fosse sempre esistito. La fisica deve permettere all'intero volume di essere popolato dai barioni dopo la fine dell'inflazione, senza che al tempo stesso debba apparire un ugual numero di antibarioni.

4. Alcune quantità, a differenza del numero barionico, sono effettivamente conservate: per esempio la carica elettrica. E la carica elettrica totale del nostro universo potrebbe essere ora (ed esserlo sempre stata, ed esserlo per sempre) esattamente zero.

5. L'inflazione caotica è descritta, per esempio, in Andrej Linde, *Particle Physics and Inflationary Cosmology*, Harwood, New York 1990.

11

RELIQUIE ESOTICHE E ANELLI MANCANTI

Niente conosco, *se non* miracoli.

WALT WHITMAN

È solo grazie al fatto che riusciamo a percepire configurazioni e regolarità nel mondo della natura che la scienza non rimane intasata e sommersa dall'accumularsi dei dati empirici. D'altra parte, quando riusciamo a scorgere come fatti precedentemente scollegati si colleghino insieme e riusciamo a sussumere i dati in leggi sempre più generali, dobbiamo ricordarci *meno* fatti fondamentali indipendenti, da cui tutto il resto può venir dedotto. Non abbiamo bisogno di registrare tutte le mele che cadono.

La fisica e l'astronomia sono le scienze che hanno, sin qui, avuto il più grande successo nel ridurre le sconcertanti complessità del mondo naturale a pochi principi soggiacenti. Il corso regolare della Luna e dei pianeti è noto fin dai tempi più antichi. Dobbiamo a Newton la grande idea unificatrice per cui questi moti sarebbero governati dalla stessa forza gravitazionale che ci tiene attaccati alla Terra. Nell'Ottocento il chimico russo Dmitrij Mendeleev trovò certe regolarità nelle proprietà della novantina di elementi chimici allora conosciuti. Queste manifeste regolarità della "tavola periodica" oggi le attribuiamo al fatto che gli atomi sono fatti solo da tre elementi costitutivi fondamentali. I protoni e i neutroni (barioni)

costituiscono il nucleo atomico e gli elettroni, dotati di carica elettrica negativa, orbitano intorno al nucleo secondo le leggi della meccanica quantistica. Nell'intera storia della nostra Galassia, tutti gli atomi della tavola periodica sono stati fabbricati a partire dai due più semplici, l'idrogeno e l'elio. E questi due sono, a loro volta, il risultato di reazioni nucleari che si verificarono nei primi minuti del Big Bang.

Il richiamo del fondamentale è molto forte. Le grandi intuizioni della scienza derivano dal riuscire a sistematizzare o unificare fenomeni che in precedenza non erano associati in una configurazione naturale. Tutti i fisici aspirano a unificare le forze della natura, o a sviluppare una qualche grande sintesi della relatività einsteiniana e della teoria dei quanti. E non c'è dubbio che questi siano i "problemi numero uno". Ma focalizzare indebitamente i propri talenti in un'area eminentemente teorica può risultare assai frustrante per chiunque non sia eccezionalmente dotato – o fortunato.

Non è affatto detto che sia sensato decidere di indirizzare le proprie scientifiche fatiche puntando direttamente ai problemi più importanti. Potrebbero essere intrattabili, o non essere ancora giunto il momento della loro soluzione. Una migliore strategia è quella di massimizzare l'importanza del problema, *moltiplicata* per le possibilità che si hanno di risolverlo. In un suo famoso saggio Peter Medawar ci ricorda che "nessuno scienziato viene ammirato per aver fallito nel tentativo di risolvere problemi che andavano al di là della sua competenza. Il massimo cui potrebbe aspirare è quel genere di cortese disprezzo che viene concesso ai politici utopisti. Se la politica è l'arte del possibile, la ricerca scientifica è sicuramente l'arte del solubile. [...] I buoni ricercatori studiano i problemi più importanti che ritengono di poter risolvere".

La ricerca scientifica si sviluppa un po' come il disegno di una coperta *patchwork*. Alcuni campi alla moda vengono coltivati intensamente: ogni volta che un "capobranco" propone una nuova idea, su di essa si avventano orde di lupacchiotti (in genere di primo pelo), ben dotati di talento. Ma in altri campi progetti interessanti e opportuni ottengono in genere

meno attenzione, semplicemente perché i ricercatori che avrebbero le competenze per occuparsene sono già impegnati in qualcos'altro.

La ricerca di teorie unificanti ha fatto molta strada dai tempi di Mendeleev in qua. Lo scopo è quello di scoprire le regolarità e le relazioni soggiacenti fra forze e particelle, e di rendere il mondo subatomico meno confuso e arbitrario di quello che ci appare. Negli anni Settanta i fisici svilupparono una teoria divenuta poi nota come "modello standard della fisica delle particelle elementari". Questo modello mise un po' d'ordine nello studio del mondo subnucleare, popolato da quark, elettroni e altre particelle, ma il numero delle particelle "elementari" rimase deprimentemente elevato, e nelle equazioni entrano in gioco 18 numeri che devono essere determinati sperimentalmente e non possono essere derivati o almeno intercorrelati dalla teoria. Né è probabile che si riesca a far di meglio, a meno di qualche nuova scoperta sperimentale. Come dice il fisico delle particelle John Polkinghorne, "È difficile credere, visto lo spirito instancabilmente competitivo dei giovani teorici più brillanti, sempre ansiosi di farsi una reputazione confutando o rimpiazzando le idee dei loro vecchi, è difficile credere che ci possano essere molte – ammesso che ne esistano affatto – alternative razionali che siano sfuggite all'attenzione a causa di un'indolente acquiescenza verso lo *status quo*".

Il modello standard ha costituito un progresso reale: dà conto dei risultati della maggior parte degli esperimenti, anche quelli effettuati con acceleratori ad alta energia. Ma è chiaramente insoddisfacente, con tutti quei suoi numeri che restano inspiegati. C'è poco consenso su quale sarà la prossima tappa verso l'unificazione delle forze fisiche fondamentali. Uno dei bastoni fra le ruote è il fatto che le caratteristiche distintive delle teorie unificate probabilmente si manifestano solo a energie che sarebbero esistite unicamente negli istanti iniziali del nostro universo – e in nessun altro luogo o tempo, eccetto forse nelle più intime profondità dei buchi neri. Teo-

rie matematicamente elaborate come quella delle superstringhe sono ancora digiune di qualsiasi sperimentazione reale.

Portata al limite, la tendenza verso la teorizzazione barocca può esser poco salutare: l'essenza di qualunque scienza sta nella possibilità di confrontarsi con l'esperimento e l'osservazione, non nel ritrarsene. Di qui l'importanza dell'interfaccia con la cosmologia: nelle immediate prossimità dell'inizio del nostro universo le particelle si sarebbero mosse con molta più energia di quanta se ne possa generare in esperimenti di laboratorio.

I teorici stanno esplorando tutta una gamma di idee su come si potrebbero unificare e forze e particelle: con un po' di fortuna una di queste potrebbe essere quella giusta. La cosmologia può offrire qualche indizio per scoprirla? Queste teorie, per esempio, predicono qualcosa sull'universo in cui ora ci troviamo che sia manifestamente incompatibile con le osservazioni? O (meglio ancora) predicono l'esistenza di reliquie o fossili che potrebbero venire effettivamente scoperti?

Utilizzando una fisica ormai ben stabilita possiamo estrapolare all'indietro nell'evoluzione cosmica fino allo stadio in cui l'universo aveva un millisecondo (10^{-3} secondi) di vita; gli acceleratori di particelle più potenti possono generare le condizioni che prevalevano quando aveva 10^{-14} secondi; prima di questo momento le energie sarebbero state ancora più alte. Ma molte caratteristiche cruciali potrebbero essere state impresse al nostro universo quando l'orologio cosmico segnava 10^{-36} secondi, o addirittura prima. In questi contesti bisogna mettere sullo stesso piano ogni potenza di 10 nell'età dell'universo – ogni zero in più segnato dall'orologio cosmico. Il salto da 10^{-12} a 10^{-36} è dunque più grande (visto che occupa un maggior numero di potenze di 10) del tempo trascorso fra i tre minuti in cui si formò l'elio (circa 200 secondi) e l'era attuale (circa 3×10^{17} secondi, o dieci miliardi di anni).

La ricerca di "fossili" sopravvissuti a quelle ere ultraprimordiali, di "anelli mancanti" fra il cosmo e il micromondo è dunque importante, e per il cosmologo e per il fisico delle particelle. In questo capitolo descriveremo tre possibilità

straordinarie, che potranno forse essere scoperte un giorno: buchi neri grandi come un atomo, ma con la massa di una montagna; monopoli magnetici; stringhe che si allungano per tutto l'universo, più sottili di un nucleo atomico, ma tanto pesanti che la loro gravità potrebbe aver innescato la formazione delle galassie.

La radiazione di Hawking: un'idea unificatrice

Verso il 1974 Stephen Hawking era già famoso per le sue ricerche sulla gravitazione. Aveva guidato il rinascimento di questo campo di studi sbocciato in seguito alle intuizioni matematiche di Penrose e aveva chiarito la natura dei buchi neri. Si cominciava a prendere sul serio l'idea che i buchi neri potessero effettivamente esistere.

Ma la sua salute diventava sempre più debole. Non erano pochi i giorni in cui mi trovavo a dover spingere la sua sedia a rotelle fino al suo studio. Non poteva prendere in mano un libro, nemmeno girarne le pagine: gli aprivo un testo di elettrodinamica quantistica – la teoria sviluppata da Richard Feynman, Freeman Dyson e altri, che dà conto con una accuratezza fantastica della radiazione degli elettroni e degli atomi. E lui tutti i giorni se ne stava seduto lì, ingobbito, quasi senza muovere un dito, ore e ore. Leggeva e pensava. Il suo male sembrava sopraffarlo; avevo ben poche speranze che potesse riuscire a portare a termine ancora qualcosa. Ma dopo mesi di elucubrazioni, arrivò a intuire una nuova visione, che connetteva le teorie di Dyson e Feynman (che non hanno niente a che vedere con la gravità) con la relatività einsteiniana. Dimostrò infatti che i buchi neri non sono poi completamente neri, ma devono irradiare; e per soprammercato scoprì una nuova connessione fra la gravità e la termodinamica. Dyson valutò questi risultati concettuali come "una di quelle grandi idee che unificano la fisica".

Hawking ha continuato imperterrito nella sua ricerca, concentrandosi specialmente sul problema di riconciliare la teo-

ria dei quanti con la cosmologia. Ma questi problemi restano controversi: vent'anni dopo varie "scuole" in conflitto fra loro abbracciano ancora punti di vista alternativi e non è chiaro se prevarrà l'approccio favorito da Hawking. Ma il significato e l'importanza dei suoi articoli del 1974-75 sulla radiazione quantistica dei buchi neri sono stati riconosciuti da tutti. Quelle idee erano però così contrarie alle intuizioni prevalenti all'epoca che, lì per lì, si mostrarono difficili da assimilare. Quando Hawking presentò per la prima volta le sue idee a un convegno a Oxford, John Taylor, che presiedeva la sessione, non si peritò di denigrarle apertamente; e poco dopo Taylor, insieme con Paul Davies (che sarebbe poi diventato un famoso divulgatore scientifico), pubblicò un articolo in cui "si confutavano" quelle assurdità. Ci volle più di un anno persino agli esperti più in vista – gente del calibro di Zel'dovič e i suoi colleghi moscoviti – per convincersi delle affermazioni di Hawking. Il concetto di evaporazione di un buco nero, che si possano o meno osservare gli effetti che esso predice, si staglia come una vetta nella nostra comprensione generale della gravità.

Minibuchi

I buchi neri possono avere qualsiasi dimensione: il loro raggio è proporzionale alla loro massa. I vasti buchi nei centri delle galassie, pesanti quanto un miliardo di soli, potrebbero inghiottire l'intero sistema solare. Un buco che pesi quanto il Sole avrebbe un diametro di sei chilometri; ma il diametro scenderebbe a soli otto millimetri se il buco avesse la massa della Terra. E un buco nero delle dimensioni di un atomo? Un buco del genere sarebbe pur sempre enormemente *più pesante* di un atomo: nel diametro di un nucleo atomico potrebbero sistemarsi migliaia di tonnellate di materiale. Per fabbricarlo occorrerebbe che circa 10^{36} protoni si inscatolassero nello spazio che normalmente è occupato da uno solo. Questo numero particolarmente grande non sorprenda: la repulsione

elettrica fra due protoni è 10^{36} volte più forte dell'attrazione gravitazionale fra loro. Occorre dunque mettere insieme questo enorme numero di protoni prima che la gravità possa competere con le interazioni elettriche e nucleari così più forti di lei.

Ogni cosa che orbita vicino a un buco nero è soggetta a un'attrazione gravitazionale che è più forte sul lato che guarda il buco e più debole sul lato opposto. La differenza fra queste due attrazioni, la forza di marea, lacera qualsiasi stella (o qualsiasi pianeta, o astronauta) che si avvicini troppo. Gli effetti gravitazionali e "di marea" sono più selvaggi nei pressi di buchi neri di dimensioni atomiche, così più violenti da influenzare persino i singoli elettroni e protoni.

Lo spazio privo di oggetti, il "vuoto", brulica di attività a livello della scala quantistica microscopica. La famosa relazione di indeterminazione di Heisenberg permette alle particelle di prendere in "prestito" energia per un tempo molto corto: una particella e un'antiparticella possono così prendere in prestito l'intera energia della loro massa a riposo (mc^2) e vivere una brevissima, transeunte esistenza. Queste coppie di particelle virtuali sono latenti ovunque. Ma nei pressi di un piccolo buco nero la gravità può accelerare una particella con tanta violenza che questa riesce a rimborsare l'energia mc^2 che aveva preso in prestito nel breve spazio di tempo concessole dalle relazioni di indeterminazione. Non ha bisogno di annichilirsi per ripagare il debito: una coppia virtuale può invece trasformarsi in una particella *reale* e in un'antiparticella altrettanto *reale*. Una delle due sfugge al buco, l'altra vi rimane intrappolata con un'energia negativa. Il buco si restringe leggermente – ha acquistato energia negativa. L'altra particella, che trasporta energia positiva, sfugge alla presa del buco nero.

Dunque, i buchi neri, in fin dei conti, emettono qualcosa; brillano, invece di essere completamente "neri". Ma i buchi possono emettere (per esempio) elettroni solo se a loro volta non sono più grandi di un elettrone, cosicché questo effetto è importante solo per i "minibuchi".[1] I buchi più grandi sono più freddi, non possono creare elettroni e positroni, ma pos-

sono irraggiare luce o microonde (o altri tipi di radiazione) con lunghezze d'onda più lunghe delle dimensioni del buco. I buchi neri formati dalla morte di stelle di grande massa si troverebbero solo a un milionesimo di grado al di sopra dello zero assoluto. Per questi buchi – e, *a fortiori*, per quelli ancora più grandi ospitati dai centri delle galassie – il processo di Hawking è del tutto trascurabile: i grandi buchi neri irradiano energia molto più lentamente di quanta non succhino dalla radiazione a 2,7 gradi che pervade persino lo spazio intergalattico.

Ma la temperatura di un minibuco delle dimensioni di un nucleo atomico è di un miliardo di gradi. Una radiazione così intensa sarebbe rilevabile se un oggetto del genere venisse a trovarsi nei pressi della Terra. E quando un minibuco irraggia, si restringe, e la sua emissione si fa più calda e più intensa, fino a che non arriva a scomparire in un ultimo lampo di raggi gamma.

Prima che Hawking arrivasse a queste conclusioni, vari ricercatori avevano applicato i concetti di calore e temperatura ai buchi neri. Era già noto che l'area dell'orizzonte intorno ai buchi neri può crescere (per esempio, se vi cadono dentro oggetti e il buco accresce la sua massa), ma non può mai decrescere; era noto che se due buchi si fondono, l'orizzonte intorno al buco risultante dalla fusione avrebbe un'area maggiore di quelle dei due buchi originari sommate insieme. Quest'area cresce inesorabilmente: da questo punto di vista è simile all'entropia, la quantità che misura il "disordine" o la casualità di un sistema. E, secondo la famosa seconda legge della termodinamica, l'entropia non può mai diminuire.

Il fisico israeliano Jakob Bekenstein (che allora studiava con John Wheeler a Princeton) spinse più oltre questa analogia, sottolineando che, se l'area di un buco nero assomigliava all'entropia, allora l'intensità della gravità sul suo orizzonte doveva essere il corrispondente della temperatura. Ma si muoveva su un terreno viscido, perché all'epoca si presumeva che i buchi neri dovessero essere assolutamente neri, capaci di assorbire radiazioni, ma incapaci di emetterne alcuna. L'intuizione di Bekenstein fu riscattata quando Hawking mostrò che i buchi irraggiano con una temperatura che dipende dall'intensità della forza gravitazionale sul loro orizzonte.[2]

La teoria dell'evaporazione dei buchi neri, detta a volte "radiazione quantistica dei buchi neri", ha superato la prova incrociata di essere ridimostrata in vari modi alternativi da vari ricercatori. Ma niente può sostituire l'osservazione diretta delle relazioni che vengono previste teoricamente. E allora: possono esistere veramente dei buchi neri molto piccoli?

Buchi neri che evaporano?

L'universo è tutto sforacchiato dai buchi neri, che segnalano la morte di una stella o una catastrofe colossale nel centro di una galassia. Ma nessun processo astrofisico può creare buchi neri più piccoli di due o tre masse solari. Ogni stella di massa più piccola, anche se ha esaurito tutto il suo combustibile nucleare, può sopravvivere indefinitamente, in modo del tutto stabile, sotto forma di stella di neutroni o di nana bianca. Potrebbe trasformarsi in un buco nero solo se fosse compressa da un'enorme pressione esterna o se implodesse raggiungendo densità ancora più alte di quelle di una stella di neutroni. Qualsiasi cosa più piccola di una stella – un pianeta o un asteroide – dovrebbe venir compresso fino a densità ancora maggiori.

I soli buchi neri che irraggiano in modo significativo sono quelli piccolissimi. Negli anni Sessanta Wheeler ventilò la possibilità della creazione di tali buchi per implosione di una massa di dimensioni opportune. C'è un rinnovato interesse all'idea (che peraltro mantiene un sapore decisamente fantascientifico), perché si pensa che, tramite un qualche effetto quantistico, lo spazio interno al buco potrebbe germogliare dando origine a un nuovo universo. Alan Guth ha scritto in tono semiserio della possibilità "di creare un universo in laboratorio", facendo implodere una massa di soli cento chili finché raggiunga densità così estreme da diventare un buco nero

piccolissimo. Ma se scoprissimo un minibuco, non dovremmo necessariamente interpretarlo come un artefatto di una superciviltà galattica: potrebbe essere, invece, una reliquia dell'universo primordiale.

Nei suoi primissimi stadi il nostro universo avrebbe potuto essere compresso fino a densità assai maggiori di quelle di una stella di neutroni. Igor Novikov si rese conto per primo che a quelle tremende pressioni si sarebbero potuti creare dei buchi neri molto più piccoli di quelli che si formano nel nostro universo attuale. La probabilità che ciò avvenga dipende da quanto fossero caotiche o irregolari le condizioni di quei primi momenti. Non basta infatti che le pressioni siano molto alte: è necessario che ci siano *differenze* notevoli di pressione fra un luogo e un altro perché si inneschi l'implosione. Le migliori ipotesi su queste fluttuazioni suggerirebbero (vedi capitolo 7) che la pressione fosse abbastanza uniforme. La formazione dei minibuchi richiederebbe che l'universo primordiale fosse più rugoso (con increspature di maggiore ampiezza o con fluttuazioni di curvatura più pronunciate) su piccola scala di quanto non lo fosse su scale più grandi, quelle rilevanti per la formazione delle galassie. Insomma, un po' come in un oceano, dove i cavalloni, più corti, sono anche più alti delle onde oceaniche più grandi e più lente.

Una speculazione ancora più estrema è che i "semi" dei buchi neri si sarebbero potuti formare direttamente al tempo di Planck (10^{-43} secondi), dalla "schiuma dello spazio-tempo" stessa: sarebbero stati di gran lunga più piccoli addirittura di un nucleo atomico, ma si sarebbero potuti ingrandire attirando materia dal loro ambiente ultradenso.

I buchi neri sono candidati possibili per la materia oscura delle galassie, come abbiamo visto nel capitolo 6. Ma i buchi neri piccolissimi non sono oscuri, irraggiano, e sono brillantissimi. Buchi che pesassero meno di mille miliardi di tonnellate (della misura di meno di 10^{-10} centimetri) non sarebbero oscuri abbastanza; né ce ne sarebbero abbastanza da costituire tutta la materia oscura senza che la loro radiazione combinata di raggi X e raggi gamma non venisse osservata. Ma di

minibuchi del genere, ovviamente, ce ne potrebbero essere anche meno.

Buchi con masse molto inferiori a 10^{15} grammi non avrebbero potuto sopravvivere dal tempo del Big Bang fino ai giorni nostri: sarebbero evaporati molto tempo fa. Alcuni di essi potrebbero essere in preda agli ultimi spasimi della loro agonia per evaporazione. Un minibuco simile, della taglia di un protone, potrebbe irraggiare 10 gigawatt nel corso dell'intera vita del sistema solare. Questi oggetti straordinari hanno per ora un'esistenza solo ipotetica, ma le loro proprietà sono state rigorosamente dedotte da due delle teorie meglio stabilite della fisica del XX secolo, la relatività generale e l'elettrodinamica quantistica. Rappresentano "fossili" possibili dei primissimi momenti dell'universo, "anelli mancanti" che potrebbero illuminare la ricerca di connessioni profonde fra la gravità e le forze che governano il micromondo.

Nei rantoli dell'agonia i minibuchi emettono raggi gamma così intensi da poter essere rilevati a molti anni luce di distanza. Anzi, poco dopo che Stephen Hawking aveva fatto la sua scoperta, mi resi conto che ci potrebbe essere un modo ancor più sensibile di rilevarli. L'esplosione finale potrebbe emettere una palla di fuoco molto intensa fatta di elettroni e positroni. I deboli campi magnetici che pervadono lo spazio interagirebbero con questa palla di fuoco, convertendo la sua energia in un *flash* di onde radio. E i radiotelescopi sono enormemente più sensibili dei telescopi a raggi gamma e potrebbero scoprire un evento del genere, provocato da un oggetto più piccolo di un nucleo atomico, persino se si verificasse nella galassia di Andromeda, lontana due milioni di anni luce.[3]

Monopoli

Michael Faraday, all'inizio del XIX secolo, mostrò che le forze magnetiche e quelle elettriche sono interconnesse: un magnete che si muove crea una forza elettrica (e influenza un galvanometro); reciprocamente, il movimento di cariche elet-

triche (una corrente elettrica) crea un campo magnetico. Queste famose scoperte stanno alla base della dinamo e dei motori elettrici. Sempre nel corso dell'Ottocento James Clerk Maxwell sviluppò poi una teoria che unificava l'elettricità e il magnetismo nell'"elettromagnetismo". Nelle sue equazioni c'è una simmetria completa nel modo in cui appaiono le due forze – campi elettrici che variano rapidamente provocano campi magnetici, e viceversa. Ma c'è una differenza significativa: esistono cariche elettriche positive e negative, ma non si può isolare un polo "nord" e un polo "sud" magnetici: se si taglia un magnete in due, tutto ciò che si ottiene sono altri due magneti più piccoli, ciascuno con i suoi due poli.

I portatori fondamentali della carica elettrica sono, ovviamente, gli elettroni. Possiedono una carica elettrica negativa "standard"; i protoni ne hanno una esattamente uguale, ma positiva. Nel 1931 Paul Dirac cercò di capire perché le cariche elettriche siano quantizzate in questo modo. Immaginò una spiegazione molto elegante, che però poteva funzionare solo se esistessero effettivamente magneti con un polo solo: i monopoli. Paul arrivò persino a calcolare la "carica magnetica" che ipotetici oggetti di questo genere avrebbero dovuto possedere se la sua teoria fosse stata corretta.

Dirac non si aspettava che i monopoli fossero estremamente pesanti, e siccome non se ne osservava neanche uno, la sua idea finì con l'essere messa da parte. La ricerca dei monopoli è stata decisamente scoraggiante. Semplici argomenti vietano che ne esistano molti: esattamente come le cariche elettriche o i conduttori possono mettere in corto circuito un campo elettrico, i monopoli magnetici (metà con una carica magnetica "nord", metà "sud") tenderebbero a cancellare un campo magnetico se ci scorrazzassero attraverso. La nostra Galassia è pervasa per intero da un campo magnetico, che non potrebbe esistere se ci fossero troppi monopoli.

I monopoli vengono oggi percepiti in nuove vesti, come "nodi" del vuoto. Nell'universo veramente primordiale il vuoto stesso sarebbe stato molto diverso. Non esistevano nuclei atomici: anzi, le due forze che tengono uniti i nuclei – le

forze elettriche e l'interazione nucleare forte – non avevano un'esistenza separata. Queste forze acquisirono le loro caratteristiche distinte dopo una transizione durante la quale il vuoto stesso cambiò natura. Prima di questa transizione c'era energia persino nel vuoto.[4]

Così come il ghiaccio – nella transizione dell'acqua dalla fase liquida a quella solida – può non diventare un cristallo perfetto, così questa transizione cosmologica lascerebbe nello spazio vuoto dei difetti "congelati". Due teorici, Alexander Polyakov e Gerard t'Hooft, hanno formulato indipendentemente la teoria odierna dei monopoli. Essi, e altri, si resero conto che, se le teorie di grande unificazione fossero corrette, i monopoli si sarebbero *dovuti* creare appena 10^{-36} secondi dopo il Big Bang, quando le forze si differenziarono. Questi monopoli, a differenza di quelli che immaginava Dirac, sarebbero molto pesanti – circa 10^{15} volte più pesanti delle particelle ordinarie – e sarebbe dunque impossibile crearli in laboratorio. Tuttavia, da quei tempi remoti ne dovrebbe essere sopravvissuto un numero scomodamente grande: ce ne sarebbero stati abbastanza da mettere in corto circuito il campo magnetico galattico; peggio ancora, la loro massa totale supererebbe di un bel po' quella di qualsiasi altra cosa dell'universo: sarebbe di gran lunga troppa anche per la materia oscura.

Uno dei titoli di merito che Guth reclamava per il suo universo inflazionario è che esso risolve il cosiddetto problema del monopolo: i monopoli si sarebbero diluiti esponenzialmente nel corso dell'inflazione, a un punto tale che ci sarebbero scarse probabilità di trovarne anche uno solo in tutta l'intera Galassia. Lo scettico nei confronti della fisica esotica non resterà molto impressionato da un argomento teorico che spiega l'assenza di particelle puramente ipotetiche. La medicina preventiva sembra non trovare molte difficoltà nell'ottenere un'efficacia del cento per cento nella lotta a una malattia inesistente!

I monopoli hanno una struttura molto interessante: i loro nuclei sarebbero effettivamente un piccolo campione di ciò che doveva essere l'universo quando aveva appena 10^{-36} se-

condi di vita. Ognuno di essi rappresenterebbe così un fossile microscopico delle prime e incerte fasi della storia cosmica. Una particella che si avvicinasse a testa bassa a un monopolo sperimenterebbe, come in un film visto mentre si riavvolge velocemente nel videoregistratore, le condizioni che prevalevano al tempo del Big Bang fino all'epoca di 10^{-36} secondi.

Nel nostro universo attuale una particella non può essere creata (o annichilita) senza che la stessa cosa accada a un'antiparticella. Ma nell'universo primordiale questa legge dovrebbe essere stata violata – cosa di cui Sacharov (vedi capitolo 9) si accorse per primo – altrimenti ogni protone sarebbe ormai stato annichilito insieme al suo antiprotone e il nostro universo non conterrebbe altro che radiazione. Un protone che si scontri con il nucleo di un monopolo ritornerebbe in un ambiente esotico simile all'universo primordiale, in cui potrebbe annichilirsi e convertire la sua massa in energia, anche in assenza della sua antiparticella.

Siccome il nucleo di un monopolo sarebbe piccolissimo, le annichilazioni si verificherebbero raramente, salvo là dove la materia fosse impacchettata molto densamente. I luoghi più densi del nostro universo attuale sono le stelle di neutroni, dove la massa di una montagna è strizzata in una scatoletta con un centimetro cubo di volume. (Nemmeno una densità del genere basta per creare un minibuco: bisognerebbe strizzarla ancora fino a farle raggiungere le dimensioni di un nucleo atomico.) Le stelle di neutroni sono un ambiente ottimale per l'annichilazione per un secondo motivo: oltre a essere gli oggetti più densi che conosciamo, sono anche fortemente magnetizzate.[5]

I monopoli si dirigerebbero – quasi piccioni viaggiatori – verso questi forti campi magnetici come a una loro base. Quelli catturati da una stella di neutroni si sistemerebbero dalle parti del suo centro, e ogni volta che annichilassero una particella, si genererebbe calore. Nella Galassia ci sono circa cento milioni di stelle di neutroni, residui di esplosioni di supernove. La maggior parte di esse dovrebbe essere relativamente fredda, altrimenti i telescopi a raggi X le avrebbero rilevate. Dentro di loro, dunque, non si dovrebbero essere accumulati troppi monopoli. La bassa temperatura delle stelle di neutroni antiche limita in effetti il numero dei monopoli della nostra Galassia più rigidamente della persistenza di campi magnetici su grande scala. La ricerca sperimentale dei monopoli è una sfida da far spavento: potrebbero anche esistere, ma gli astronomi sono fin da adesso sicuri che, ammesso che ci siano, sono molto rari.

Stringhe

I monopoli sono il tipo più semplice di "nodo" o "difetto topologico" che possa rimanere intrappolato nello spazio. Una possibilità ben più spettacolare è quella offerta dalle "stringhe cosmiche", difetti topologici a forma di fili lunghissimi, che potrebbero essere sopravvissuti ai primissimi istanti dell'universo.[6]

Tom Kibble, della University of London, è stato un pioniere in questo campo: avanzò le idee chiave su queste stringhe cosmiche ancora negli anni Settanta. Quando il vuoto passò da quello stato di alta energia che pilotava l'inflazione del cosmo primordiale a essere semplicemente ciò che oggi chiamiamo "spazio vuoto", una parte dello stato originario del vuoto avrebbe potuto rimanere intrappolata, quando il nostro universo aveva un'età di 10^{-36} secondi, all'interno di tubicini molto sottili, le stringhe. Queste sarebbero più sottili di un atomo per almeno 20 potenze di 10, ma avrebbero una massa immensa, 10^{17} tonnellate per metro lineare.

Le stringhe non possono avere estremità. Si estendono per l'universo tutto intero o, alternativamente, formano dei lacci chiusi, come un elastico. Le vibrazioni di un normale elastico dipendono dalla sua tensione e da quanto pesa (o da quanta inerzia possiede). Le stringhe cosmiche, anche se sono molto pesanti, hanno una tensione così alta che vibrano a velocità prossime a quella della luce. Un reticolo di stringhe "aperte" si aggirerebbe per lo spazio flagellandolo con le sue vibrazio-

ni. A volte due stringhe potrebbero intersecarsi; o, anche, una stringa aperta potrebbe contorcersi su se stessa fino ad autointersecarsi, chiudendo così un laccio. Il reticolo di stringhe, in ogni momento, consisterebbe dunque di stringhe aperte che si estendono insieme con l'espansione dell'universo e di lacci di varie misure.[7]

Tali stringhe cosmiche non vanno confuse con le superstringhe di cui abbiamo parlato nel capitolo 9. Quest'ultime sono entità ipotetiche che vivono in uno spazio a dieci dimensioni e che potrebbero soggiacere a tutte le particelle e le forze presenti in natura. Anche le stringhe cosmiche sono oggetti ipotetici, in quanto la loro esistenza dipende da caratteristiche non ben conosciute dell'universo ultraprimordiale. Ma, se esistono, si tratta di oggetti di lunghezza cosmica (e non microscopica come le superstringhe) e potrebbero avere effetti osservabili – addirittura spettacolari – nell'universo in cui ora viviamo.

Persino se l'universo ai suoi inizi fosse altrimenti stato del tutto liscio e uniforme, l'attrazione gravitazionale delle stringhe avrebbe creato fluttuazioni. Negli anni Ottanta lo stesso Kibble, Alex Vilenkin e Neil Turok esplorarono la possibilità che le stringhe a laccio abbiano potuto essere i "semi" intorno a cui si formarono le galassie. I lacci, scaglionati lungo una gerarchia di scale, si ammasserebbero in un modo che ricorda quello delle galassie. L'idea, tuttavia, non è sopravvissuta a un più attento esame. Un problema, per esempio, è quello che le stringhe a laccio si sarebbero andate scontrando nello spazio a una velocità pari a circa un decimo di quella della luce: e a velocità simili la loro gravità non avrebbe potuto catturare il materiale circostante con un'efficacia sufficiente a fabbricare una galassia.

Per quanto deludente, questa conclusione non fa diminuire la probabilità che le stringhe esistano veramente – significa solo che l'universo primordiale doveva possedere altri tipi di irregolarità, diverse dalle stringhe. E nemmeno fa calare l'incentivo a ricercare oggetti simili, che tengono un piede nel

micromondo e l'altro sulla scala cosmica in modi così straordinari.

Che succederebbe se ci fosse una stringa vicino a noi? Una stringa diritta distorcerebbe lo spazio in modo tale che se si tracciasse un cerchio intorno a lei, la circonferenza si richiuderebbe dopo aver percorso un po' meno di 360 gradi. Ma se tale stringa si stesse muovendo e ci passasse in mezzo, la distorsione dello spazio si manifesterebbe in modo drammatico: come se le nostre due metà venissero spiaccicate l'una sull'altra a velocità supersonica. Per fortuna, qualsiasi reticolo di stringhe pesanti che aspiri a essere realistico sarebbe così tenue che potrebbe benissimo darsi che nella nostra Galassia non ci sia nemmeno una stringa e meno che mai nel nostro sistema solare. Dobbiamo dunque cercare effetti un po' meno drammaticamente spettacolari.

Siccome le stringhe distorcono lo spazio intorno a loro, deflettono la luce inducendo un caratteristico effetto-lente gravitazionale. Una galassia sullo sfondo di una lunga stringa ci apparirebbe come duplicata in due immagini uguali, una per lato della stringa stessa. Le ricerche di coppie di galassie apparentemente uguali che si adattino a questa descrizione, però, non hanno sin qui dato alcun risultato.[8] Il che non rappresenta comunque un esito fatale per l'ipotesi dell'esistenza delle stringhe, dato che sembra che non possano esistere abbastanza stringhe da influenzare una porzione di cielo maggiore di un centomillesimo: gli astronomi dovrebbero aver avuto una fortuna sfacciata se avessero già individuato una stringa, date queste limitazioni. Una prova non ambigua di effetti-lente gravitazionali ci direbbe quante tonnellate pesi una stringa per metro lineare, quantità questa che si connette direttamente ai dettagli delle teorie unificate che non sono ancora stati precisati per via sperimentale. (E questa è, infatti, un'altra ragione per cui ai fisici piacerebbe assai scoprire una stringa.)

Le stringhe possono rivelare la loro presenza indirettamente perché le loro flagellanti vibrazioni generano radiazione gravitazionale: onde di fluttuazioni gravitazionali che si muovono nello spazio alla velocità della luce. E queste onde po-

trebbero venir scoperte come sottoprodotto di un programma di ricerca del tutto privo di relazioni con le stringhe, e cioè la determinazione accurata del periodo delle pulsar.

Le onde gravitazionali originate dalle stringhe hanno periodi di anni – nel caso di lacci molto grandi, addirittura di migliaia di anni. Queste onde distorcerebbero leggermente l'intero spazio. Sarebbe come se ogni stella, in ogni galassia, stesse "trepidando" leggermente intorno alla sua posizione media. La velocità relativa del Sole rispetto a una stella lontana aumenterebbe e diminuirebbe seguendo i cicli di queste onde. Se una stella possiede un orologio che trasmette dei bip-bip regolari, la fluttuazione della sua distanza influenzerebbe il tempo con cui ci arrivano i segnali. Per esempio, onde gravitazionali con un periodo di dieci anni darebbero luogo a dei bip-bip che ci arrivano prima della media durante cinque anni, e dopo la media nei cinque anni seguenti. Una fluttuazione di, per esempio, un chilometro, farebbe anticipare o ritardare l'arrivo del segnale di un tempo pari a quello impiegato dalla luce per percorrere un chilometro, ovvero 3,3 microsecondi circa. Così, se lo spazio fosse pervaso da onde gravitazionali, il tempo battuto da questi orologi stellari sarebbe leggermente erratico.

È assai notevole che alcune stelle siano, di fatto, orologi piuttosto precisi. Si tratta delle pulsar, stelle di neutroni ruotanti, con una specie di faro sulla loro superficie, da cui riceviamo un segnale radio a ogni loro rotazione (vedi capitolo 4). Alcune pulsar, specie quelle che ruotano più rapidamente (fino a 600 rotazioni al secondo), battono il tempo in modo veramente preciso: gli impulsi radio sono così corti e precisi che i loro tempi di arrivo possono essere misurati fino a *frazioni* di *micro*secondo. Si riesce a rilevare nei dati persino moti che ammontano a qualcosa come 100 metri all'anno, tre millimetri all'ora. Se le stringhe esistono e sono abbastanza pesanti da far sì che i loro campi gravitazionali abbiano indotto la formazione delle galassie, le loro onde gravitazionali dovrebbero indurre effetti, per l'appunto, di quest'ordine di grandezza.

L'idea che le stringhe cosmiche siano stati i semi da cui è

germogliata la formazione delle galassie ha qualcosa di straordinario. Ma ancor più straordinario è pensare che queste stringhe generino le onde gravitazionali che Joseph Taylor e i suoi colleghi possono rilevare osservando moti irregolari di stelle di neutroni distanti migliaia di anni luce, anche ammettendo che queste onde facciano muovere le stelle più lentamente della lancetta delle *ore* di un orologio!

O scopriremo presto stringhe abbastanza pesanti da aver avuto un ruolo nella formazione delle galassie, o potremo mettere da parte l'idea. Ma sarà più difficile rilevare o escludere l'esistenza di stringhe più leggere. La ricerca di queste e altre esotiche reliquie di quei primi 10^{-35} secondi, così densi di eventi, con cui iniziò la storia del nostro cosmo è destinata a continuare.

NOTE

1. Un buco nero ha una temperatura ben definita, proporzionale alla forza gravitazionale a livello della superficie del suo orizzonte. Questa forza dipende da M/r^2. Il raggio r di un buco è proporzionale alla sua massa M, cosicché questa "temperatura di Hawking" dipende da $\frac{M}{M^2} = \frac{1}{M}$: è quindi proporzionale all'inverso della sua massa.

2. Ogni volta che l'entropia aumenta, si perde informazione. Per esempio, se inizialmente abbiamo una scatola divisa in due scomparti, uno che contiene del gas caldo (cioè atomi che si muovono velocemente) e l'altro del gas freddo (atomi lenti) e togliamo il separatore in modo che gli atomi lenti e veloci possano mescolarsi, ne sappiamo meno di prima sulla localizzazione di ciascun atomo. Quando si forma un buco nero va persa ogni traccia di ciò che l'ha costituito. La sua "entropia" può quindi essere pensata come una misura di tutti i possibili modi diversi che possono aver condotto alla sua formazione.

3. C'è tuttora discussione se l'evaporazione di un buco nero porterebbe alla sua completa scomparsa o lascerebbe dietro di sé un qualche tipo di relitto. La risposta dipende in parte da un altro problema: se un buco nero sia o meno portatore di un qualche tipo di "carica" che si conservi e che il buco non può disperdere irraggiandola. Nel nostro universo la carica elettrica viene conservata esattamente; nondimeno, se un buco nero al momento della sua formazione avesse avuto una carica positiva, avrebbe sempre potuto cancellarla ingoiando particelle dotate della carica opposta. D'altra parte, un buco nero non potrebbe liberarsi della "carica magnetica" che

possedeva al momento della sua formazione: potrebbe allora sopravvivere come suo residuo una particella magneticamente carica con una massa di 10^{-5} grammi. Tali particelle andrebbero aggiunte alla lista di "reliquie esotiche" che descriviamo in questo capitolo.

4. In effetti, ci sarebbe stata una "repulsione cosmica" enorme: l'universo si sarebbe espanso con una forte accelerazione. È questo lo "stadio inflazionario" di cui abbiamo parlato nel capitolo 10.

5. Le stelle di neutroni sono i densi residui delle esplosioni delle supernove; quelle ancora giovani vengono scoperte dagli astronomi sotto forma di pulsar o di sorgenti di raggi X (vedi capitolo 4).

6. I monopoli possono essere pensati come difetti topologici zero-dimensionali (sono puntiformi). Le stringhe sono monodimensionali. In linea di principio potrebbero esistere anche difetti *bi*dimensionali, ma darebbero un fastidio ancora maggiore di quello di un numero eccessivo di monopoli. Per contro, le stringhe sarebbero salutate con entusiasmo da molti cosmologi.

7. La statistica delle reti – le misure dei lacci, e se la lunghezza totale dei lacci sia o no maggiore di quella totale delle stringhe aperte – è tuttora controversa; è difficile simulare una parte abbastanza grande dell'universo e per un periodo di tempo abbastanza lungo, da poter asserire con sicurezza che si tratta di risultati affidabili. Frustando lo spazio a una velocità prossima a quella della luce, le stringhe emettono onde gravitazionali. Queste onde trasportano l'energia dei lacci, che di conseguenza si restringono fino a dimensioni molto piccole. (Lo stato finale – che scompaiano completamente, o che lascino dietro di sé una qualche particella dotata di massa – non è ben determinato, proprio come nel caso dell'evaporazione dei buchi neri.)

8. Gli astronomi hanno anche cercato di osservare gli effetti caratteristici che una stringa che si muovesse velocemente dovrebbe indurre nella radiazione cosmica di fondo. Se una stringa si muove nel cielo dovrebbe indurre uno spostamento verso il rosso (e di conseguenza un apparente "raffreddamento") della radiazione a microonde su uno dei suoi lati, mentre sull'altro questa dovrebbe apparire più "calda".

12

VERSO L'INFINITO: IL FUTURO REMOTO

In questa grande Celestiale Creazione la Catastrofe di un Mondo, quale è il nostro, o puranco la totale dissoluzione di un Sistema di Mondi, potrebbe forse altro non essere per il grande Fattore della Natura che quello che è per noi il più comune Accidente della Vita, e con ogni Probabilità un tale ultimo e generale Giudizio Finale potrebbe essere altrettanto frequente di quanto qui fra noi, sulla Terra, non siano le Nascite, o le Morti.

Questa Idea ha in sé qualcosa che tanto mi è caro che non posso mai alzare gli occhi alle Stelle senza domandarmi perché tutti non vogliano farsi Astronomi – e riconciliarsi con tutte quelle piccole Difficoltà inerenti all'umana Natura, senza la minima Ansietà [...].

THOMAS WRIGHT DI DURHAM (1752)

I prossimi cento miliardi di anni

Fra circa cinque miliardi di anni il Sole morirà, gonfiandosi fino a diventare una gigante rossa, inghiottendo i pianeti interni e vaporizzando la vita sulla Terra. Si stabilizzerà poi come una nana bianca che si andrà lentamente spegnendo. Circa alla stessa epoca, miliardo più miliardo meno, la Galassia di Andromeda, che già sta cadendo verso di noi, si fonderà con la Via Lattea. Quando due galassie si fondono, per la maggior parte le stelle che le costituiscono rimangono illese. La probabilità di una collisione frontale fra due stelle è solo di uno su cento miliardi. Ma i moti di tutte le stelle sarebbero severamente perturbati e il grande disegno del disco galattico e

dei bracci a spirale verrebbe sconvolto.[1] Il risultato sarà, probabilmente, un unico sciame di stelle rassomigliante a una gonfia galassia ellittica.

A cosa potrà assomigliare il nostro universo quando sarà dieci volte più vecchio di oggi, diciamo fra 100 miliardi di anni? L'espansione cosmica si va rallentando a causa dell'attrazione gravitazionale che ogni galassia esercita sulle altre. Se la densità non supera il valore critico – se omega è minore o uguale a 1 – il nostro universo è destinato a espandersi per sempre. Ma se la densità fosse sostanziosamente più elevata; la gravità farebbe decelerare l'espansione fino ad arrestarla; anzi, se omega fosse circa 2, prima che passino cento miliardi di anni ogni cosa sarebbe stata già inghiottita in una strizzata finale, nel Big Crunch.

La maggior parte dei cosmologi scommetterebbe che il nostro universo si starà ancora espandendo fra 100 miliardi di anni. Le opinioni ora più diffuse sono che omega sia all'incirca 0,2, o, per motivi d'ordine teorico, che sia quasi esattamente uguale a 1. Una votazione per alzata di mano fra i partecipanti a un convegno del 1995 ebbe come risultato una sostanziale parità fra queste due vedute – anche se, rassicuratevi!, solo una piccola minoranza pensava che si trattasse di un buon modo per definire problemi controversi nella scienza.

I pregiudizi teorici possono cambiare. All'inizio degli anni Settanta gli indizi derivanti dalle osservazioni erano più vaghi di ora (e, per quello che erano, suggerivano che omega fosse piccolo); nondimeno il pregiudizio a favore di un universo "chiuso" e finito era assai diffuso. Un universo del genere collasserebbe dopo un periodo di tempo finito e conterrebbe solo una quantità finita di materia: quanto più grande fosse, tanto più a lungo durerebbe. Non sembrava ci fosse qualche particolare motivo perché l'universo in cui ci troviamo dovesse essere enormemente più grande della parte che già avevamo visto. Né perché dovesse gonfiarsi fino a raggiungere dimensioni molto più grandi di quelle attuali, o perché dovesse continuare a espandersi molto più a lungo di quanto non avesse già fatto.

C'erano alcune argomentazioni filosofiche a favore di un universo chiuso. Una di esse si basava sul cosiddetto "problema dell'inerzia". Già Galileo si era reso conto che in un laboratorio privo di finestre non c'è modo di conoscere la velocità, ma solo l'accelerazione. Ma la *rotazione* sembra un caso diverso. Se si fa roteare un secchio pieno d'acqua, la superficie del liquido si altera, formando una depressione al centro e innalzandosi ai bordi del secchio. Newton osservò che ciò non dipende dal fatto che il secchio condivida o meno la rotazione del liquido che contiene: la superficie dell'acqua risponde alla rotazione in un qualche sistema di riferimento "assoluto", certamente non relativo al secchio.

Newton ci diede il concetto di sistema di riferimento inerziale: un liquido che ruota, un giroscopio, un pendolo individuano un sistema di riferimento speciale e possiamo determinare sperimentalmente se il nostro laboratorio sta ruotando rispetto a esso. Ma è tuttora misterioso che cosa sia a determinare questo sistema di riferimento non rotante speciale. Già prima dell'epoca di Newton si trattava di un problema filosofico dibattuto. Fra coloro che lo discussero, Giovanni Buridano (scolastico francese dell'inizio del XIV secolo, famoso per il suo asino la cui logica non scendeva a compromessi e che si lasciò morire di fame non sapendosi decidere fra una mangiatoia piena di paglia e una di fieno) asseriva: "Bisogna attribuire ai corpi celesti la più nobile delle condizioni – ma è più nobile e più perfetto essere in quiete che in moto. Di conseguenza, la sfera più sublime dovrebbe trovarsi in quiete".

Nell'Ottocento il fisico e filosofo austriaco Ernst Mach sostenne che il sistema inerziale era di fatto determinato dal moto medio di tutti i "corpi celesti": l'asse di un giroscopio, per esempio, sarebbe fisso relativamente alle galassie lontane. Che cosa accadrebbe allora a un secchio rotante, si domandava, se si potesse togliere via il resto dell'universo? A Mach sembrava che un sistema di riferimento inerziale non avesse senso in un universo vuoto. Il "principio di Mach", come finì per essere chiamato, da allora in poi, ha avuto un ruolo preminente nei dibattiti cosmologici. Fra gli universi che soddisfa-

no le equazioni della relatività generale, ce ne sono alcuni in cui le galassie lontane si muoverebbero molto lentamente nel cielo, rispetto all'asse di un giroscopio. Se Mach aveva ragione, un qualche principio aggiuntivo restringerebbe gli universi possibili più di quanto non facciano le equazioni di Einstein, eliminando le soluzioni rotanti. Einstein prese sul serio il principio di Mach, e riteneva che solo gli universi "chiusi" e finiti potessero essere veramente machiani. Ho ricavato questo punto di vista da Wheeler, che sosteneva con molto vigore che il nostro universo deve essere abbastanza denso per garantire che finirà per collassare nuovamente.

A favore di un universo finito c'è anche quest'altro argomento, dotato di un certo fascino: l'insieme dei vari universi separati risulterebbe un concetto più facile da mandar giù se ogni membro dell'insieme fosse finito invece che infinito.

Conto alla rovescia per il Big Crunch?

L'universo chiuso, che ricollassa su se stesso, era certamente la mia ipotesi preferita nel lontano 1969, quando scrissi un breve articolo pretenziosamente intitolato "Il collasso dell'universo: uno studio escatologico", a proposito di ciò che sarebbe accaduto se il nostro universo collassasse.

Supponiamo che la densità attuale sia pari a due volte il valore critico (o, in altre parole, che omega sia uguale a 2). L'espansione si arresterebbe quando le galassie arrivassero a essere lontane fra loro il doppio di quanto lo sono ora. Dopodiché, comincerebbero a cadere una verso l'altra e lo spostamento verso il rosso si trasformerebbe in uno spostamento verso il blu. Lo spazio già ora è tutto sforacchiato da buchi neri creatisi o alla morte di stelle di grande massa, o in eventi cataclismatici nei centri galattici che si manifestano sotto forma di quasar. Ma questi buchi neri sarebbero solo i precursori di una compressione universale che alla fine inghiottirebbe ogni cosa.

Circa cento milioni di anni prima del Crunch vero e proprio, cioè della Strizzata, le singole galassie si fonderebbero tutte insieme. Col procedere del conto alla rovescia le stelle rimanenti, non più in contatto con la loro galassia-madre, sarebbero disperse nell'universo in corso di contrazione. Si muoverebbero sempre più veloci col procedere della contrazione, così come gli atomi di un gas chiuso in un contenitore si muovono più veloci (e il gas si scalda) quando il contenitore viene compresso. Alla fine le stelle si schianterebbero scontrandosi una contro l'altra. Fui però sorpreso nel calcolare che la maggior parte delle stelle sarebbe stata già distrutta prima di addensarsi tanto da potersi scontrare. Il cielo, illuminato dalla radiazione di tutte le altre stelle spostata verso il blu (e in più dalla radiazione di fondo primordiale, che si riscalderebbe anch'essa nel corso della compressione) diventerebbe più caldo delle stesse stelle. Queste verrebbero cotte in un forno addirittura più caldo di loro, e succhierebbero calore più velocemente di quanto non riescano a sbarazzarsene; si gonfierebbero in uno sbuffo finale per disperdersi poi sotto forma di gas.

Tutto ciò non accadrebbe prima che fossero passati 50 miliardi di anni da ora; il tempo che ci resta è almeno dieci volte la futura vita del Sole. Il risultato finale sarebbe una palla di fuoco simile a quella con cui iniziò la nostra espansione.

Ma il collasso non sarebbe *esattamente* uguale al Big Bang iniziale; la direzione del tempo invertita non sarebbe l'unica differenza. L'universo primordiale era liscio e uniforme, salvo che per delle "increspature" che si evolvettero poi in galassie e ammassi; l'universo del futuro remoto sarebbe invece irregolare e non sincronizzato. Il nostro universo va sviluppando sempre più struttura via via che si espande e questa tendenza non si invertirebbe nel corso della fase di contrazione. Tutto ciò che è già caduto in un buco nero ha ormai, di fatto, sperimentato cosa dovrebbe essere il *crunch* finale; nel corso della contrazione si formerebbe un numero anche maggiore di buchi neri e la materia sarebbe soggetta a moti violenti che la sconvolgerebbero. Roger Penrose crede che questa differenza fra gli stadi iniziali lisci e quelli finali irregolari sia cruciale nel-

lo stabilire la direzione della freccia del tempo (riprenderemo il problema nel capitolo 13).

Un universo che collassa in una palla di fuoco potrebbe rimbalzare in uno nuovo, come la mitica Fenice? Nulla potrebbe impedire alla densità di sfuggire all'infinito, in una singolarità. Una volta si riteneva che una "singolarità" del genere fosse un prodotto artificioso derivante dall'imporre speciali condizioni di simmetria e uniformità. Se, per esempio, le stelle di un ammasso fossero attratte gravitazionalmente verso l'interno in modo esattamente uniforme e simmetrico, chiaramente si scontrerebbero tutte insieme esattamente nel mezzo. Tuttavia, secondo la teoria newtoniana, moti laterali anche piccoli impedirebbero loro di convergere tutte verso lo stesso punto; potrebbero anche mancare lo scontro, e l'ammasso si riespanderebbe fino alle dimensioni originarie. Qualcosa di analogo potrebbe avvenire anche a un universo che collassa. Penrose e Hawking hanno però mostrato che questa intuizione di stampo newtoniano è fuorviante. Le singolarità sono inevitabili anche quando il collasso è irregolare: l'energia cinetica stessa (dato che l'energia equivale alla massa) esercita una gravità aggiuntiva, e l'attrazione si autoalimenta.

Le condizioni fisiche di un "rimbalzo" trascendono la fisica che riusciamo a capire, cosicché non si può dire nulla sulla possibilità che l'universo rimbalzi in un nuovo ciclo; e meno ancora su quale e quanta memoria di ciò che avvenne prima del grande *crunch* potrebbe conservarsi. Il concetto di una freccia del tempo – di ciò che è "prima" e di ciò che è "dopo" – viene meno in queste condizioni estreme.

Espansione perpetua

E nell'altro caso, invece, che succederebbe? Se non ci fosse abbastanza materia gravitante da riuscire ad arrestare l'espansione? Il nostro universo avrebbe tutto il tempo per continuare a correre verso la morte termica finale. Se un cosmologo dovesse rispondere alla domanda "Che succede nel nostro

universo?" con una sola frase, una buona risposta potrebbe essere: "Si libera energia gravitazionale, via via che le stelle, le galassie e gli ammassi si contraggono progressivamente e questa tendenza inesorabile viene ritardata dalla rotazione, dall'energia nucleare e dalla pura e semplice scala dei sistemi astronomici; e tutto ciò fa sì che le cose accadano più lentamente e allontana la vittoria finale della gravità". Se il nostro universo si espanderà per sempre, ci *sarà* però abbastanza tempo perché le stelle, le galassie, tutto, arrivi a un equilibrio terminale.

Il cielo si mostrerebbe sempre più nero via via che le galassie si disperderanno, sempre più rade nello spazio che si espande. Ma il nostro universo diventerebbe più scuro anche per un altro motivo. Le galassie si farebbero intrinsecamente più fioche. Gli atomi da cui sono costituite continuerebbero a essere riciclati, una generazione di stelle dopo l'altra: l'idrogeno verrebbe tutto lavorato in elio, e su su nella tavola periodica. Non si potrebbero più formare stelle brillanti con combustibile ormai quasi spento. Sempre maggiori quantità di gas rimarrebbero imprigionate o in stelle deboli di massa molto piccola, o in residui morti: stelle di neutroni, nane bianche, buchi neri.

Poi, proprio come avverrà alla nostra Via Lattea e ad Andromeda, la maggior parte delle galassie si mescolerà con le altre dello stesso gruppo o dello stesso ammasso. I superammassi diventeranno una sola unità: i buchi neri nel centro di ciascuna galassia sprofonderanno nel centro del sistema risultante dalla fusione, circondati da uno sciame di stelle morte. L'ammassamento gerarchico che ha già portato alle galassie, agli ammassi, ai superammassi, proseguirà su scale ancora maggiori.[2]

Gli atomi non sono eterni...

La maggior parte degli atomi che si radunarono per costituire una galassia finirà col rimanere intrappolata in buchi neri o in residui stellari inerti; ogni galassia diventerà solo un

oscuro sciame di fredde nane bianche, stelle di neutroni e buchi neri. Ma alla fine persino gli atomi decadranno: se i barioni di cui sono fatti fossero assolutamente immutabili (così come crediamo che sia la quantità di carica elettrica del nostro universo), l'eccesso di materia rispetto all'antimateria non sarebbe mai emerso dall'universo dei primordi. Il decadimento finale dei protoni ristabilirà la simmetria fra materia e antimateria con cui il nostro universo era iniziato.

La vita media di un atomo supera l'attuale tempo di Hubble (l'"età attuale" del nostro universo) di oltre 20 potenze di 10. Nonostante che una tonnellata di materia contenga all'incirca 30 atomi, uno sperimentatore dovrebbe tener d'occhio molte tonnellate (e forse molte migliaia di tonnellate) per riuscire a rilevare anche solo un decadimento all'anno. Ma, col tempo – e ce ne sarebbe abbastanza – le nane bianche e le stelle di neutroni si dissolverebbero; e così il gas intergalattico. L'energia se ne volerebbe via sotto forma di elettroni e di neutrini.

I buchi neri non sarebbero influenzati dal decadimento dei protoni. Ma anche loro non vivrebbero per sempre. Essi disperdono energia tramite il processo di "evaporazione quantistica" (vedi capitolo 11). Questo processo potrebbe essere importante – e addirittura cospicuo – nell'universo attuale, se le enormi pressioni dei primissimi momenti dell'universo avessero creato dei minibuchi. Questi piccoli buchi neri, pesanti quanto una montagna ma di dimensioni ridotte a quelle di un nucleo atomico, irraggiano intensamente; via via che perdono energia e massa si restringono, ma irraggiano allora con energia ancora maggiore, e potrebbero alla fine scomparire in uno scoppio finale di particelle e raggi gamma.

I buchi neri più grossi sono più freddi e irraggiano più lentamente. Quelli che si formano quando muoiono le stelle ci metterebbero 10^{66} anni per evaporare. Ma un universo in espansione perpetua darebbe loro il tempo per farlo: ci sarebbe, addirittura, abbastanza tempo per l'evaporazione dei buchi neri di massa enorme, ciascuno pesante quanto milioni di stelle, annidati nel centro delle galassie e che decadono ancor più lentamente. Tutto ciò che i buchi neri fossero riusciti a inghiottire verrebbe così restituito, riciclato sotto forma di radiazione.

Se persino i buchi neri più pesanti finissero coll'evaporare, non resterebbe null'altro che radiazione, ed elettroni e positroni. Un elettrone può annichilirsi se collide con un positrone. È assai improbabile che si scontrino direttamente; nondimeno gli elettroni e i positroni potrebbero legarsi insieme formando coppie in cui ciascuno dei due orbiterebbe intorno all'altro, per poi cadere a spirale uno verso l'altro. L'universo sarebbe a quel punto diventato così rarefatto che ci sarebbe in media meno di un elettrone in un volume grande quanto il nostro universo osservabile attuale. Si potrebbero formare coppie binarie di ampiezza immensa: il moto di un elettrone potrebbe essere controllato dal campo elettrico di un positrone distante dieci miliardi di anni luce. Ma passeranno gli eoni. L'irraggiamento li condurrà più vicini. E anche loro si annichiliranno.

...e la "vita"?

La prima discussione completa di ciò che potrebbe accadere in un universo in perpetua espansione uscì in un articolo intitolato "Tempo senza fine: fisica e biologia in un universo aperto". Si trattava di un lavoro dettagliato e per un pubblico di esperti, a differenza del mio sul collasso dell'universo, e apparve in una rivista austeramente tecnica, *Reviews of Modern Physics* (l'articolo che lo seguiva, in quello stesso numero, portava l'arcigno titolo "Soluzioni classiche della teoria di Yang-Mills SU(2)"). Il suo autore, Freeman Dyson, riesce a combinare, quasi unico fra i fisici, la genialità nella matematica formale con l'entusiasmo per le speculazioni di vasta portata. L'indiscussa eccellenza scientifica di Dyson risale al 1947, quando era ancora studente. La teoria oggi nota col nome di elettrodinamica quantistica – la teoria più precisa e con maggiori successi dell'intera fisica – era stata sviluppata da Richard Feynman e da Julian Schwinger, utilizzando approcci piutto-

sto diversi (come anche, del tutto indipendentemente, da Sin-itiro Tomonaga in Giappone). Dyson mostrò che le idee matematiche profondamente diverse che soggiacevano agli approcci di Feynman e di Schwinger avrebbero potuto essere collegate.

La maggior parte della sua carriera si è svolta come professore presso l'Institute for Advanced Study di Princeton. In questa non comune istituzione non ci sono studenti: i suoi membri, liberi dai doveri e dalle limitazioni che si addossano sulle spalle di chiunque lavori in un comune centro di ricerca o in una qualunque università, sono generosamente finanziati e sostenuti nel perseguire qualsiasi ricerca stuzzichi la loro fantasia. Nonostante lui abbia continuato a studiare aspetti matematici formali della fisica, l'influenza di Dyson si è fatta in seguito sentire maggiormente attraverso le sue speculazioni al limite della fantascienza, e i suoi libri e le sue conferenze celebrano eloquentemente la diversità e la complessità del nostro mondo. La sua carriera è una delle migliori giustificazioni (è difficile trovarne molte) per l'esistenza di rifugi intellettuali in cui si sia liberi da impegni didattici come l'Institute for Advanced Study.

Il nostro universo si espanderà per sempre? Dyson non è in grado di dircelo – di fatto, nessuno è in grado di decidere oggi questo problema – ma non ha dubbi su quello che vorrebbe succedesse:

> La fine di un universo chiuso è stata studiata in dettaglio da Rees. Devo disgraziatamente concordare con lui che in questo caso non avremmo altra scelta se non finire arrosto. Potremmo anche rintanarci nelle più remote profondità della terra per ripararci dalla radiazione di fondo spostata verso il blu: non faremmo altro che posporre di qualche misero milione di anni la nostra miserevole fine [...] Mi dà un senso di claustrofobia immaginare la nostra esistenza confinata dentro una scatola.

Dyson scrisse il suo articolo dopo il lavoro di Hawking sull'evaporazione dei buchi neri, ma prima che l'idea del decadi-

mento del protone fosse generalmente accettata. Prendeva così in considerazione cosa sarebbe successo se, dopo che persino i buchi neri fossero completamente evaporati, fossero rimaste ancora delle nane bianche o delle stelle di neutroni. La morte termica finale verrebbe sospinta più lontano, molto più lontano. Ma non per sempre, comunque. Una stella di neutroni potrebbe trasformarsi in un buco nero per mezzo dell'effetto tunnel quantistico. Questo evento immensamente improbabile – 10^{57} atomi che saltano "quantisticamente" all'unisono – non c'è da aspettarselo se non dopo un tempo così enorme che, scritto per esteso, richiederebbe tanti zeri quanti sono gli atomi dell'universo. Il tempo che il buco nero risultante impiegherebbe poi per evaporare sembra quasi istantaneo, al confronto.

Ma qual è la prognosi per qualche esotica forma di vita intelligente? Persino dopo la morte di tutte le stelle – evento che precluderebbe ogni manifestazione del vivente come quelle che si sono evolute qui sulla Terra – la "vita" potrà sopravvivere? Potrà svilupparsi intellettualmente per sempre, pensando pensieri infiniti, accumulando e comunicando un corpus di informazione che si andrebbe sempre accrescendo? Le riserve di energia sono finite. Bastano, però, minimi impulsi energetici per immagazzinare o trasmettere informazione se ciò viene fatto a basse temperature. E l'universo, espandendosi, si raffredderà sempre di più. Invece di trovarsi 2,7 gradi sopra lo zero assoluto, fra mille miliardi di anni avrà una temperatura inferiore a un millesimo di grado. E con lo scendere della temperatura ambiente ogni concepibile forma di vita o di intelligenza dovrebbe pensare più lentamente e ibernarsi per lunghi intervalli.

Se i protoni durassero per sempre, potrebbero venir fabbricati reticoli enormemente complessi ma estremamente esili. Ci sono limitazioni del tutto generali alla taglia e alla complessità di un organismo (e, se è per questo, anche di un computer) perché qualsiasi cosa troppo pesante verrebbe schiacciata dalla gravità, e i suoi marchingegni interni genererebbero troppa potenza per poter essere dispersa per irraggiamen-

to. Ma le strutture del remoto futuro potrebbero trascendere tutte e due queste limitazioni. La gravità potrebbe venir soppressa, perché per quanto massicce, queste costruzioni potrebbero venir estese su spazi sufficientemente grandi. E potrebbero avere una superficie sufficientemente ampia da poter irraggiare e rimanere quasi alla stessa temperatura della radiazione di fondo, che diminuisce col procedere dell'espansione; l'energia minima per trasmettere un'unità di informazione diventerebbe sempre più piccola. Il trattamento dell'informazione – il "pensiero" – sarebbe molto lento in una configurazione tanto estesa: la velocità sarebbe limitata da quanto tempo un segnale impiegherebbe ad attraversarla, muovendosi alla velocità della luce (è questo, ovviamente, il motivo per cui i supercomputer vengono costruiti quanto più compatti possibili). Ma quale urgenza c'è mai, quando si hanno eoni ed eoni a disposizione?

Non sarebbe necessario che l'evoluzione giungesse a un punto terminale, nemmeno se tutti i protoni svanissero. Ci potrebbero essere sempre dei buchi neri, a patto che crescessero, per coalescenza, con una velocità sufficiente a controbilanciare la loro erosione dovuta all'evaporazione. (Le loro masse dovrebbero crescere come la radice cubica del tempo: aumentare di dieci volte per mille giri dell'orologio cosmico.) Questi buchi potrebbero concentrare abbastanza energia per creare nuova materia. E persino un gas diluito fatto da elettroni e positroni potrebbe fornire una base per un insieme di circuiti controllato dai complessi campi magnetici e dalle correnti che pervaderebbero il mezzo. Idea quest'ultima che ricorda l'intelligenza inorganica tratteggiata nella *Nuvola nera*, il primo libro di fantascienza di Fred Hoyle – che fu anche quello meglio costruito e più immaginoso.

Un'eternità soggettiva prima della Grande Strizzata?

Anche se il tempo "fisico" continuasse a scorrere per sempre, Dyson arriva alla rassicurante conclusione che non si do-

vrebbe respingere come un'ovvia assurdità la possibilità di avere davanti a noi una quantità infinita di tempo *soggettivo*. L'ultimo atto di un universo in espansione perpetua viene rappresentato sempre più al rallentatore; ogni azione elementare – un pensiero, o il trattamento di un bit di informazione – richiede più tempo, sempre più tempo. Come una serie infinita di numeri (che so, 1 + 1/2 + 1/4 + 1/8 + ...) si può sommare dando una somma finita, il tempo "soggettivo" potrebbe anche avere un limite finito.

Il "tempo" che compare nelle equazioni della fisica con il simbolo t non è necessariamente una buona misura del "tempo" il cui scorrere è segnato da una successione di eventi significativi.[3] In un universo che si espanda eternamente, il ritmo dell'attività si fa sempre più lento. Forse, rovesciandola, questa distinzione fra tempo "soggettivo" e tempo "fisico" ci permette di concepire il Big Crunch più ottimisticamente.

Il tempo è misurato dal ticchettare di orologi standardizzati. Tuttavia non c'è orologio concepibile in grado di sopravvivere alle fasi finali di una Grande Strizzata; ogni orologio che cadesse in un buco nero verrebbe fatto a pezzi dalle forze di marea prima di incontrarsi con la singolarità. Possiamo cominciare a misurare il tempo in termini di anni, usando come orologi le orbite dei pianeti intorno alle stelle. Ma, col procedere del "conto alla rovescia" per il Big Crunch, i dintorni di una qualunque stella si andrebbero facendo alquanto affollati: le stelle si schianterebbero una contro l'altra e nessun pianeta potrebbe continuare a girare imperterrito nella sua orbita: dovremmo cominciare a usare orologi atomici. E gli stessi atomi finirebbero con l'essere distrutti. E via via che le condizioni si andassero facendo sempre più estreme, avremmo bisogno di orologi sempre più piccoli e sempre più rapidi, vertiginosi, per battere il tempo. Nessuna successione finita di orologi potrebbe mai registrare ogni istante fino in fondo, fino alla singolarità.

Tutto ciò fa venire in mente il classico paradosso di Zenone sull'impossibilità del moto: prima di arrivare alla fine di un percorso, dovete arrivare a metà, e prima a un quarto, e così

via: c'è un infinito numero di cose che dovete fare prima di poter cominciare. Per quanto paradossali sembrino queste nostre affermazioni su un universo che collassa, non sono però così chiaramente fallaci come l'argomento di Zenone. Diversamente che nel nostro mondo quotidiano non c'è nessun orologio naturale che possa essere usato per tutta la durata del tempo. C'è invece una serie infinita di orologi sempre più veloci, da utilizzare uno dopo l'altro.

La singolarità finale, vista da questa prospettiva, appare come una remota astrazione, separata da noi da un numero infinito di eventi intermedi. John Barrow e Frank Tipler hanno sviluppato quest'idea fino ai suoi ultimi limiti. Se il Big Crunch fosse simmetrico e uniforme, una specie di Big Bang fatto riavvolgere da un videoregistratore cosmico, non ci sarebbe alcuna possibilità di avere un tempo soggettivo infinito. Si tratta di un corollario dell'argomento di Dyson su un universo in espansione perpetua: Dyson trovava che il fatto che le riserve di energie siano finite non costituisce una limitazione perché l'energia potrebbe essere utilizzata in quanti sempre più piccoli col raffreddarsi globale dell'universo; per contro, i quanti di energia necessari si andrebbero facendo sempre maggiori (e l'energia verrebbe usata in modo sempre meno efficiente) via via che l'universo si comprime e si riscalda.

Barrow e Tipler sostengono che le prospettive di un tempo soggettivo infinito migliorerebbero se il collasso fosse "sghembo", se cioè avvenisse anisotropicamente. Le loro argomentazioni si basano su idee sviluppate alla fine degli anni Sessanta da Charles Misner, che mostrò che gli universi anisotropi esibirebbero un comportamento da lui battezzato *mixmaster*: violenti moti di torsione strizzerebbero l'universo in contrazione alternatamente in direzioni diverse. Queste torsioni potrebbero generare abbastanza energia da fornirne un numero di quanti arbitrario, nonostante la limitazione che tali quanti dovrebbero diventare sempre più grandi col procedere del collasso. (L'intervento, però, di effetti quantistici sul campo gravitazionale potrebbe soffocare questo processo e impedire ogni regresso infinito.) Tipler si spinge a immaginare che un Big

Crunch anisotropo offrirebbe un ambiente propizio per strutture complesse dotate di almeno alcuni degli attributi del vivente, a patto che il nostro universo duri altri 10^{15} anni prima del collasso finale, in modo da darci abbastanza tempo per prepararci all'evento.

Tasto FF>>: avanti veloce nel futuro

I nostri discendenti dovranno seguire le prudenti e conservatrici massime dysoniane per sopravvivere in un futuro infinito? O, all'estremo opposto, finiranno arrosto, nel forno di un Big Crunch che arriverà alla temperatura di cottura fra qualche decina di miliardi di anni? Dovremo compilare un inventario più completo di ciò che abbiamo in questo nostro universo, studiando tutte le lunghezze d'onda, cercando ogni possibile forma di materia oscura, prima di poter fare previsioni per i prossimi cento miliardi di anni e oltre.

Ma se siete dotati di un temperamento apocalittico e non avete la pazienza di aspettare cento miliardi di anni, allora vi posso consigliare un tuffo a capofitto in un buco nero. Vi incontrerete con una singolarità, creata da un collasso gravitazionale locale, che prefigura quella del Big Crunch. I buchi neri si formano quando le stelle pesanti muoiono – forse dopo l'esplosione di qualche supernova – e ce ne sono a milioni nella nostra Via Lattea. Buchi neri mostruosi, pesanti quanto un miliardo di soli, se ne stanno in agguato nel centro di alcune galassie, relitti di una catastrofica fase-quasar che la galassia attraversò nella sua giovinezza. Fareste meglio, potendo, a scegliere uno di questi: sono così spaziosi, che anche dopo esserci saltati dentro vi resteranno varie ore di caduta libera per godervi il panorama con tutta tranquillità, prima di essere fatti a pezzi dalle tensioni gravitazionali di estrema violenza che incontrerete avvicinandovi alla singolarità centrale. Se poi il buco nero stesse ruotando, con una navigazione attenta, potreste anche riuscire a sfuggirle.

Se preferite un viaggio più prudente, rimanete nelle imme-

diate adiacenze del buco. Le orbite più vicine a un buco nero in rapida rotazione hanno la notevolissima proprietà che la dilatazione temporale si fa arbitrariamente grande. Un orologio che si muovesse su una tale orbita sembrerebbe a un osservatore lontano molto spostato verso il rosso ed estremamente rallentato. Per contro, se vi sistemaste su un'orbita del genere, potreste avere una *preview* accelerata dell'intero futuro dell'universo esterno.

Rischi cosmici e pericoli terrestri

La nostra biosfera ci ha messo quattro miliardi e mezzo di anni per evolversi. Ma il sistema solare ne ha altri cinque di fronte a sé. Il nostro universo, anche se dovesse finire col ricontrarsi, ancora ha almeno il novanta per cento della sua strada da percorrere. E, se si espandesse per sempre, la vita potrebbe avere uno spazio e un tempo infiniti per svilupparsi. In questa prospettiva cosmica siamo appena all'inizio del processo evolutivo. La progressione di complessità e diversità si può spingere molto più in là. C'è tempo abbastanza perché la vita si diffonda dalla nostra Terra in tutta la Galassia, e anche oltre. E potrebbero essere le azioni dell'umanità a determinare come – o forse, se – questo processo si svilupperà. Se la biosfera della Terra fosse spazzata via, le potenzialità della vita di arrivare a proporzioni realmente cosmiche potrebbero precludersi. Se saremo pensosi di queste potenzialità, il nostro orizzonte si allargherà; potrebbe persino approfondirsi il nostro desiderio di comprendere il mondo che ci è toccato e di conservarne la ragnatela della vita.

La Terra è sempre stata vulnerabile alle catastrofi. Molte specie possono essere perite a causa di pestilenze, epidemie. Gli impatti di asteroidi e comete hanno causato estinzioni su scala mondiale. C'è una probabilità di 1 su 100.000 che nel giro dei prossimi cinquant'anni la Terra sia colpita da un asteroide abbastanza grosso da causare devastazioni planetarie: onde oceaniche alte decine e decine di metri, spaventosi terremoti e mutazioni delle condizioni meteorologiche globali. Il rischio di mortalità è basso, ma non minore (in media, per persona) di quello di rimanere uccisi in un incidente aereo. In effetti, è maggiore di quello cui sono esposti la maggior parte degli europei e dei nordamericani nei confronti di altri pericoli naturali.

A tutto ciò si aggiungono i rischi di catastrofi provocate dall'uomo. Il pericolo nucleare può forse oggi profilarsi meno grave che durante la Guerra Fredda, ma rischi del genere possono sempre tornare a galla. Ci possono essere rischi biologici, legati più che alla guerra vera e propria al terrorismo o anche a incidenti fortuiti. Ci siamo abituati all'idea che un "virus" del *software* possa diffondersi in una rete di computer. Forse, un virus costruito artificialmente dall'ingegneria genetica potrebbe causare una pandemia planetaria. I rischi che l'intera specie umana si estingua potranno anche essere bassi. Ma con strumenti tecnologici di questo tipo, facilmente accessibili a terroristi (o, se è per questo, anche a sperimentatori del tutto innocenti che potrebbero scatenare una catastrofe assolutamente senza volerlo), si può fiduciosamente stabilire il rischio, per il XXI secolo, a meno del 10 per cento? E per il secolo successivo?

Le argomentazioni *scientifiche* a favore dei viaggi spaziali umani si vanno facendo sempre più deboli con lo svilupparsi delle tecniche robotiche e di miniaturizzazione. Gli esperimenti e le esplorazioni planetarie vengono eseguiti molto meglio (e a costi di gran lunga minori) da flotte di piccole sonde senza equipaggio umano. Persino quando il programma Apollo faceva furore, le sue giustificazioni scientifiche erano piuttosto fragili. Abbiamo scoperto altrettante cose sul sistema solare studiando i meteoriti che si schiantano sulla Terra di quante ne abbiamo trovate analizzando la polvere lunare. Il programma Apollo era motivato dalla rivalità fra le superpotenze e da una dimensione spettacolare di tipo sportivo. L'*ultimo* allunaggio risale al 1972. C'è una generazione intera, oggi, cui "l'uomo sulla Luna" fa venire in mente solo scene di un remoto episodio storico, motivato da ragioni quasi altrettanto

strane di quelle che spinsero gli Egizi a costruire le piramidi. Il progamma Apollo fu visto come un fine in sé, più che come una tappa verso un obiettivo ideale di più ampia portata, la sola cosa che avrebbe potuto sostenerne il peso.

L'argomentazione più forte a favore dei viaggi spaziali umani (e forse la sola credibile) è che essi offrono una polizza d'assicurazione globale – cosmica, persino. Gli onnipresenti pericoli naturali sono aumentati da quando l'umanità è entrata nell'era del nucleare e delle biotecnologie. Le specie del nostro pianeta rimarranno vulnerabili a questi rischi fin tanto che rimarranno confinate sul pianeta. Nell'arco di un secolo – ammesso che la tecnologia spaziale mantenga il suo impulso attuale – si potrebbero sviluppare comunità in grado di autosostentarsi lontano dalla Terra. Ma è realistico distogliere risorse da bisogni ben più immediati per salvaguardarsi da un rischio (dell'un per cento? del dieci per cento?) di estinzione dell'umanità? Se ciò accadesse si disperderebbe un potenziale che si estende non solo a tutto il tempo della nostra storia, ma fino alle ere lontane in cui cominciò la nostra evoluzione dai protozoi. Anzi, forse, fino a ere molto più remote. I problemi ecologici – la fragilità della diversità biologica sul pianeta e l'importanza di preservarla – hanno oggi acquisito una grande importanza nella coscienza pubblica. Forse, queste preoccupazioni per il potenziale e per il destino della vita sulla Terra genereranno un rinnovato impegno nei confronti dei viaggi spaziali umani.

Apocalisse prematura?

Non dovremmo crucciarci troppo a proposito del possibile futuro collasso dell'universo: accadrà, se accadrà, molto tempo dopo la morte del nostro Sole. Ma se gli esseri umani potessero anticipare questa definitiva catastrofe "naturale"? Scatenare un disastro che distruggerebbe non solo la vita sulla Terra, ma l'intero Cosmo? Si tratta di uno scenario che rappresenta una conseguenza concepibile (anche se fortunatamente poco probabile) di come vediamo oggi le forze fondamentali.

Via via che il nostro universo si raffredda, lo spazio stesso – ciò che i fisici chiamano "il vuoto" – muta la sua natura, così come il vapore si condensa in acqua liquida, e questa in ghiaccio. Il vuoto è l'arena in cui interagiscono tutte le particelle e tutte le forze; quando esso attraversa una transizione di fase – un cambiamento di stato – le masse delle particelle e l'intensità delle forze che agiscono su di loro si alterano drasticamente. Secondo la teoria, generalmente accettata, di Salam-Weinberg, una transizione di questo tipo si verificò quando l'universo aveva l'età di circa 10^{-12} secondi. Prima di quell'epoca la forza elettromagnetica e l'interazione nucleare debole (che è all'opera nei fenomeni della radioattività e nelle reazioni in cui sono coinvolti i neutrini) erano combinate insieme formando un'unica forza "elettrodebole": si dovette verificare una transizione di fase per dare a queste due forze le loro proprietà attuali. I tentativi di estendere questa unificazione fino ad abbracciare anche l'interazione nucleare forte sono tuttora provvisori, ma queste teorie di grande unificazione predicono che debba esserci stata una fase, o stato, ancora precedente (quando l'universo aveva 10^{-36} secondi), durante la quale le forze che governano il micromondo (vale a dire tutte le interazioni fondamentali, eccettuata la gravità) sarebbero state combinate in un'unica forza primordiale.

Se si sono verificate già due transizioni di fase, in ciascuna delle quali il vuoto si è "raffreddato" in uno stato di più bassa energia, non potrebbero essercene o essercene state altre? Il teorico Sidney Coleman di Harvard ha congetturato che una terza transizione sarebbe sì possibile, *e potrebbe non essersi ancora verificata*. Il vuoto attuale sarebbe "sovraraffreddato", un po' come l'acqua pura può rimanere liquida al di sotto del punto di congelamento. E come basta un granellino di polvere perché il ghiaccio sovraraffreddato si cristallizzi immediatamente solidificandosi, così un cambiamento di stato del vuoto potrebbe venire scatenato da una qualche concentrazione locale di energia. Le leggi fisiche che governano l'intero

universo non potrebbero venire trasformate, come per incanto, da un qualche evento scatenante molto energetico?

Ora, la creazione della maggiore concentrazione di energia possibile è proprio lo scopo principale delle enormi macchine utilizzate dai fisici del CERN, del Fermilab e posti similari. Le particelle vengono accelerate ad alta energia e fatte scontrare. Non ci sarà il rischio che la prossima generazione di queste macchine possa inavvertitamente fare a pezzi la fabbrica dello spazio? Sarebbe questa la catastrofe ultima, finale. Una bolla formata dal vuoto di nuovo tipo si espanderebbe nell'universo alla velocità della luce. Non avremmo neanche un preavviso del suo avvicinarsi, nemmeno sapremmo che cosa ci ha colpito. La superficie della bolla continuerebbe a gonfiarsi fino a inghiottire tutto il nostro universo. Peggio che mai, il "nuovo" universo all'interno della bolla sarebbe un nato morto in cui nulla si potrebbe mai evolvere: si comporterebbe come un universo inflazionario dal tempo invertito, strizzando ogni cosa fino a una densità infinita.

Prima che venissero eseguiti i primi test nucleari, i fisici prudentemente calcolarono, con risultati rassicuranti, se l'esplosione di una bomba termonucleare non avrebbe potuto innescare il deuterio contenuto negli oceani del pianeta. Ma ciò che Sidney Coleman ha immaginato sarebbe una catastrofe cosmica, non solo planetaria.

All'Institute for Advanced Study di Princeton l'aura di Freeman Dyson incoraggia i fisici ad azzardare le speculazioni più sfrenate. Nel corso di un mio soggiorno a Princeton discussi con Piet Hut (un giovane collega di Dyson) del rischio di una simile catastrofe cosmica. Hut aveva già studiato in precedenza un altro tipo di catastrofe, terrestre, però, e non nucleare. Insieme ad alcuni colleghi di Berkeley aveva congetturato che una stella molto debole potesse essere intrappolata in un'orbita molto eccentrica intorno al Sole. Più o meno ogni 35 milioni di anni l'orbita si tufferebbe in mezzo al sistema solare, perturbando le comete e scatenando una pioggia di impatti che devasterebbero la Terra (e a questi impatti si attribuiva la responsabilità dell'estinzione dei dinosauri). Ci sono

prove incontrovertibili di impatti (non necessariamente periodici, però) di comete e di asteroidi sulla Terra; uno di questi potrebbe effettivamente aver spazzato via i dinosauri; in futuro noi stessi potremmo dover subire un simile destino. Ma questa teoria, la cosiddetta "teoria della Nemesi", è stata ormai abbandonata: l'orbita proposta sembrava interessante, ma pare che non sia occupata da nessun corpo stellare.

Sperimentatori incauti non potrebbero far cozzare insieme le particelle con un'energia sufficiente per trasformare il vuoto in un nuovo stato, scatenando una bolla che si espanderebbe fino a distruggere il nostro universo? Piet Hut e io abbiamo fatto alcuni semplici calcoli. Volevamo controllare se gli acceleratori di particelle dei laboratori potessero generare impatti a più alta energia di quelli che avvengono in natura. Le collisioni naturali a più alta energia coinvolgono i raggi cosmici – particelle velocissime che pervadono l'intera Galassia e forse l'intero universo osservabile. Queste particelle sono state accelerate a velocità pari quasi a quella della luce da esplosioni persino più violente di quelle delle supernove; potrebbero provenire da quelle forti radiosorgenti che abbiamo discusso nel capitolo 2, che oggi si ritiene traggano la loro energia da getti provenienti da enormi buchi neri. O potrebbero provenire dall'improvvisa liberazione di energia che si avrebbe quando, per esempio, due stelle di neutroni orbitanti l'una intorno all'altra si cadono reciprocamente addosso, coalescendo. La loro origine resta per ora un mistero, ma sappiamo grazie a misurazioni dirette che le particelle più veloci fra i raggi cosmici che ci arrivano dallo spazio hanno un'energia milioni di volte superiore a quella posseduta da una qualsiasi particella accelerata artificialmente qui sulla Terra. Una di quelle particelle – un semplice atomo – trasporta altrettanta energia di una pallottola o di una palla da tennis ben lanciata.

I raggi cosmici dotati di energie così estreme sono anche così estremamente rari (una superficie di un chilometro quadrato ne intercetterebbe solo uno per secolo) che due di essi, in realtà, non si dovrebbero mai essere scontrati in nessun posto dell'universo. Guth e io, comunque, calcolammo che

avrebbero potuto verificarsi molte collisioni fra raggi cosmici le cui energie, anche se meno estreme, sono comunque centinaia di volte superiori a quelle che potranno essere ottenute nel Large Hadron Collider, il più potente acceleratore del mondo, attualmente in costruzione presso il CERN di Ginevra. Di conseguenza, ogni prevedibile collisione indotta in laboratorio sarebbe relativamente lieve, a paragone di quelle che si sono verificate ripetutamente – e senza conseguenze catastrofiche – in tutto lo spazio interstellare.

Non si trattava di un calcolo completamente frivolo. La vulnerabilità dello spazio nei confronti di una transizione di fase catastrofica era, per ammissione generale, solo la fantasia di una teoria ancora speculativa. Ma la possibilità, in sé, non è assurda; data la nostra attuale ignoranza al riguardo delle teorie di unificazione, saremmo assai imprudenti a non tenerla in nessun conto. Piuttosto, si dovrebbe invocare cautela (se non imporla) in esperimenti che creino concentrazioni di energia che non potrebbero mai venir prodotte in natura. Possiamo solo sperare che gli extraterrestri con maggiori risorse tecniche delle nostre, se esistono, siano egualmente cauti!

NOTE

1. Nella nostra Galassia la maggior parte delle stelle si trova in un disco sottile e ciascuna di esse segue un'orbita quasi circolare intorno al centro galattico; le stelle vengono mantenute in queste orbite dall'attrazione di tutte le altre stelle e della materia oscura che equilibra la forza centrifuga. Quando si verificherà la fusione, le stelle della Galassia saranno soggette a una forza altrettanto intensa da parte di Andromeda. Ma questa forza, agendo obliquamente sul nostro disco, disorganizzerà le orbite stellari della nostra Galassia. Per contro, la gravità della Via Lattea defletterà le stelle di Andromeda fuori dal loro disco.

2. L'universo attuale presenta lievi irregolarità su scale persino più grandi di quelle dei superammassi. Proprio come i precursori delle galassie e degli ammassi erano increspature di piccola ampiezza nell'universo primordiale, così, a partire da regioni che sono oggi solo lievemente più dense della media, potrebbero arrivare a condensarsi aggregati enormi, più grandi persino dei superammassi. Una regione più densa della media anche solo dell'uno per cento si condenserebbe quando l'universo si fosse ulteriormente espanso di un fattore 100; se l'eccesso di densità fosse poi dello 0,1 per cento, l'universo dovrebbe espandersi di un fattore mille, e così via. La nostra conoscenza di questi eccessi di densità su larga scala deriva dal fatto che essi provocano leggeri scarti dall'uniformità della temperatura di fondo rilevata dal satellite COBE. La gerarchia dell'ammassamento andrà quindi via via crescendo col crescere dell'età dell'universo. I superammassi più grandi hanno dimensioni che sono solo l'uno per cento del raggio di Hubble (contengono forse un milionesimo della massa totale presente nel nostro "orizzonte"). Quando "l'orizzonte" sarà diventato più grande, anche gli ammassi maggiori diventeranno più grandi. Se Ω fosse esattamente uguale a 1 e si trovassero increspature su ogni scala (secondo le ipotesi di Harrison-Zel'dovič di cui abbiamo parlato nel capitolo 7), gli ammassi più grandi andranno aumentando la loro dimensione col crescere del raggio di Hubble. Se le "increspature" avessero un'ampiezza maggiore sulle scale più grandi, l'universo potrebbe finire col richiudersi su se stesso, perché la scala delle strutture più grandi diventerebbe grande quanto l'orizzonte stesso. D'altra parte, le increspature potrebbero farsi meno marcate coll'aumentare della scala, nel qual caso le strutture potrebbero a un certo punto smettere di crescere e di fondersi. Le differenze più drastiche si avrebbero se ci fosse una costante cosmologica lambda diversa da zero (cfr. capitolo 8). Anche se fosse troppo piccola per influenzare oggi come oggi l'espansione cosmica, essa finirebbe (a meno che non fosse esattamente nulla) coll'esercitare una repulsione cosmica che arriverebbe a sopraffare l'intensità di una gravità sempre più diluita. Un osservatore che si trovasse su un ammasso qualsivoglia vedrebbe gli altri ammassi che si disperdono a velocità sempre crescente, fino a che non ne rimarrebbe in vista nessuno.

3. A un anonimo scrittore di graffiti sui muri della University of Texas è attribuito il detto: "Il tempo è il modo che la natura ha per impedire che le cose accadano tutte insieme".

13

IL TEMPO NEGLI ALTRI UNIVERSI

> L'orologio sta correndo veloce qui a Wembley – beh, corre ovunque, credo.
>
> UN RADIOCRONISTA DI CALCIO

Gli orologi ticchettano a velocità diverse, dipende da dove si trovano e da come si muovono. Per quanto sorprendente ciò possa sembrare, siamo costretti ad accettare questa conclusione, come Einstein comprese. Ce lo impone uno stupefacente fatto sperimentale: la velocità della luce rimane la stessa sia che la misuriate muovendovi in direzione della sorgente luminosa, sia nella direzione opposta. Facciamo esperienza di tre dimensioni spaziali: destra e sinistra, alto e basso, avanti e indietro. Ci vogliono quindi tre numeri per collocare un evento nello spazio. E, per definire un evento, ci serve anche un quarto numero: il *tempo*, misurato da un qualche tipo di orologio. Il tempo differisce dalle altre tre dimensioni: abbiamo qualche libertà di movimento nelle dimensioni spaziali, ma queste, per amore o per forza, sono trasportate dal "flusso" del tempo. Einstein mostrò che il tempo e lo spazio sono legati fra loro. Due eventi non hanno una separazione univocamente definita nello spazio, né c'è un intervallo di tempo univocamente definito che li separi. Hanno invece una ben definita separazione nello spazio-tempo quadridimensionale; dato che la loro distanza nello spazio e la loro separazione temporale dipendono da come si sta muovendo l'osservatore.

Il tempo può essere ciclico? C'è una "freccia" universale che distingue il passato dal futuro? La natura proibisce cose paradossali come i "viaggi" nel passato? Ci sono limiti alla durata del "tempo" o a quanto finemente possa venir misurato?

Il tempo potrebbe anche non ticchettare eternamente. Il Big Bang potrebbe essere stato l'"inizio" del tempo e dello spazio, oltre che l'origine di tutta la materia che riempie il nostro universo. Non possiamo estrapolare nulla sulla "freccia del tempo" prima del Big Bang, né – se il nostro universo si dovesse ricontrarre – dopo il Big Crunch. E qualsiasi cosa accada al nostro universo, chiunque finisse in un buco nero saprebbe che cosa vuol dire un futuro finito (e, in effetti, il sipario calerebbe a velocità sconcertante).

Il *più lungo* intervallo di tempo sicuramente dotato di senso – l'intervallo fra il Big Bang e il Big Crunch – si estende, come minimo, ma proprio come minimo, per svariate decine di miliardi di anni. Ma che si può dire del problema opposto: c'è una scala temporale *più piccola di tutte*? O si può invece triturare il tempo in intervalli indefinitamente piccoli? La fisica quantistica fornisce una risposta. Le relazioni di indeterminazione di Heisenberg ci dicono che per misurare un intervallo di tempo con precisione sempre crescente, abbiamo bisogno di usare quanti di lunghezza d'onda sempre più corta, e quindi dotati di più alta energia. Siccome i quanti di luce si muovono a velocità finita, questo ammontare crescente di energia deve venir concentrato in dimensioni sempre più piccole (più piccole dell'intervallo di tempo che viene misurato moltiplicato per la velocità della luce). E qui ci si scontra con una limitazione, quando l'energia richiesta diventerebbe tanto alta e così densamente concentrata che collasserebbe direttamente in un buco nero. La quantificazione di questo argomento suggerisce che esista una scala temporale minima, dell'ordine di 10^{-43} secondi, comunemente chiamata il tempo di Planck. Gli eventi non possono essere ordinati temporalmente più precisamente di così.[1]

In prossimità dell'inizio (o della fine) dell'universo ogni cosa sarebbe stata schiacciata in uno stato esotico in cui le dimensioni dello "spazio" e del "tempo" si mescolavano. Anche se potessimo fidarci abbastanza della fisica dell'universo ultraprimordiale (vedi capitolo 9) per estrapolare fino all'intorno del tempo di Planck, qui troviamo una barriera insormontabile. Alcune teorie (che risalgono a idee pionieristiche di Wheeler negli anni Cinquanta) suggeriscono che su questa scala infima la dimensione temporale si mescoli con le tre dimensioni dello spazio formando una sorta di schiumante "spuma spazio-temporale". Secondo le teorie delle superstringhe correntemente vulgate, potrebbero esserci altre sei dimensioni. Lo spazio sarebbe strettamente arrotolato in queste dimensioni aggiuntive, cosicché esse si manifesterebbero solo su scale veramente piccole.

Hartle e Hawking hanno sviluppato un approccio diverso alla cosiddetta cosmologia quantistica e al problema dell'inizio del tempo. Essi ipotizzano che all'epoca delle origini la distinzione fra lo spazio e il tempo fosse confusa, di modo che la domanda "Che cosa è successo prima del Big Bang?" diventerebbe simile a "Che succede se viaggiate verso nord partendo dal Polo Nord?".

I nostri concetti di spazio e tempo derivano dall'esperienza e dalle percezioni della vita quotidiana. Non ci si dovrebbe stupire che la nostra intuizione faccia fallimento su scala cosmica o submicroscopica – direi, invece, che è stupefacente che le concezioni basate sul senso comune rimangano valide su una scala grande qual è quella cui si applicano.

La maggior parte di noi trova che un passato infinito (quale, per esempio quello che ci sarebbe in un universo stazionario, vedi capitolo 2) sia più difficile da immaginare di un futuro infinito: sentiamo che dobbiamo aver avuto un inizio, ma non avvertiamo la necessità della fine. E non si tratta solo di psicologia: la fisica offre ottime ragioni per reagire in modo differente a queste due prospettive. La famigerata seconda legge della termodinamica ci insegna che i sistemi diventano più disordinati col passare del tempo, che i corpi caldi riequilibrano gradualmente la loro temperatura e così via. Ora, se fosse già trascorso un tempo infinito, perché mai non si è già

spento tutto? L'argomento sarebbe cogente ove lo si applicasse a un sistema statico chiuso in una scatola, ma risulta meno convincente a proposito di un sistema dinamico aperto, forse infinito, come il nostro universo.

Se non possiamo estendere affidabilmente a un intero universo la nostra esperienza quotidiana (in cui la termodinamica, le nostre memorie, e molti altri fenomeni manifestamente seguono una direzione del tempo) dobbiamo confrontarci con un nuovo problema fondamentale: che cosa distingue, su scala cosmica, il "passato" dal "futuro"? C'è una universale "freccia del tempo" che punta inequivocabilmente verso il futuro?

La freccia del tempo

Con un'eccezione apparentemente banale (il decadimento radioattivo dei mesoni K menzionato nel capitolo 9), le leggi che governano il *micro*mondo sono temporalmente reversibili: un film che mostrasse le particelle subatomiche che collidono l'una con l'altra non apparirebbe diverso se proiettato alla rovescia. Il mondo fisico *macro*scopico, per contro, manifesta una ben definita freccia del tempo, stabilita dall'aumento del disordine (o entropia). Siamo abituati a vedere onde che si allontanano da una sorgente – per esempio, quando si butta un sasso nell'acqua – ma rimarremmo meravigliati se vedessimo le ondine di uno stagno convergere in cerchi concentrici verso un centro comune. La nostra percezione soggettiva del tempo è ovviamente asimmetrica. Abbiamo memoria solo del passato e le postvisioni sono in genere più affidabili delle previsioni (ma non sempre: è più facile, per esempio, predire quando un satellite artificiale in orbita finirà col bruciarsi nell'atmosfera, che inferire quando o da dove fu lanciato).

In tutta la nostra esperienza comune la freccia del tempo è affatto priva di ambiguità. Un qualsiasi film che mostri eventi quotidiani (*macro*scopici) sembra grottesco se visto alla rovescia. La causa e l'effetto vengono invertiti, le spiegazioni cau-

sali rimpiazzate da interpretazioni teleologiche. Pezzi di vetro e gocce di liquido sembrano accorrere con il chiaro scopo di riunirsi in un bicchiere pieno di vino che poi vi salta in mano in modo che possiate bere.

I vari fenomeni locali che distinguono il passato dal futuro – la crescita dell'entropia, l'asimmetria nel modo in cui la radiazione viene emessa e assorbita, il fatto che ricordiamo solo il passato – sono connessi l'un l'altro. Ma i cosmologi conoscono un altro modo di definire la freccia del tempo: in termini dell'espansione dell'universo. L'espansione sceglie una particolare direzione nel tempo; impone anche un lasso temporale finito (all'indietro nel passato, se dovesse continuare indefinitamente; nel passato e nel futuro, se l'universo dovesse ricontrarsi). Questa freccia cosmica è irrilevante nel mondo quotidiano? O la differenza fra passato e futuro potrebbe essere in realtà *imposta* dal modo con cui si comporta l'universo nella sua interezza?

Entropia e irreversibilità

Il mondo quotidiano è molto lontano dall'equilibrio termico: c'è un contrasto enorme di caldo e freddo. Non è completamente ordinato; ma non si è nemmeno spento in uno stato di disordine e casualità completa. Lo stesso vale per il cosmo su più ampie scale. Anche qui ci sono enormi contrasti fra le stelle con le loro roventi superfici (e i loro centri ancora più caldi) e gli spazi che le separano a una temperatura prossima allo zero assoluto – non lo zero assoluto, certo, perché sono riscaldati a 2,7 gradi dalle microonde, eco del Big Bang. Nel remotissimo futuro, come abbiamo discusso nel capitolo 12, le condizioni potranno forse ritornare più vicino all'equilibrio; ma anche questo richiederebbe un tempo immenso, persino a confronto dell'attuale età dell'universo.

Il nostro universo all'inizio era caldo e quasi completamente informe. Che si sia evoluto, *allontanandosi dall'equilibrio*, verso uno stato chiaramente più strutturato, lascia a prima vi-

sta perplessi. Sembra, in effetti, che ciò sia in conflitto con l'idea fondamentale della termodinamica per cui ogni cosa tenderebbe invece ad arrestarsi. Da cosa dipende l'emergere della complessa struttura del cosmo?

I due prerequisiti sono:

- *l'espansione*, che stabilisce un'asimmetria ben definita fra passato e futuro;
- *la gravità*, che permette ai contrasti di densità di amplificarsi, portando in definitiva all'emergere della struttura via via che l'universo si espande.

Se tutti i processi microscopici – collisioni fra particelle, emissione e assorbimento di fotoni, e così via – fossero molto veloci in rapporto alla velocità di espansione, ogni cosa si troverebbe, in ogni istante, in equilibrio. La materia non manterrebbe memoria alcuna; non "saprebbe" se nel passato era stata più densa o meno densa, e non porterebbe alcuna impronta della direzione del tempo. Ma, siccome il nostro universo si espande e diventa più rarefatto, queste reazioni rallentano e tendono a diventare inefficaci.

Per esempio, se le reazioni nucleari fossero più veloci (o se l'espansione fosse più lenta), tutta la materia primordiale sarebbe stata "cucinata" fino a diventare ferro, come avviene all'interno di una stella molto calda. Così, nel nostro universo nessuna stella sarebbe mai potuta esistere perché tutta l'energia nucleare disponibile sarebbe già stata consumata all'interno della Palla di Fuoco primordiale. Fortunatamente, come abbiamo raccontato nel capitolo 3, nei primi minuti dell'espansione ci fu appena il tempo perché le reazioni nucleari riuscissero a trasmutare non più del 25 per cento dell'idrogeno in elio – ma il risultato sarebbe stato del tutto diverso se l'universo fosse stato in contrazione. È questo un esempio di quanto sia cruciale l'importanza dell'espansione.

Un altro effetto irreversibile, che Sacharov segnalò per primo, stabilì un eccesso di materia rispetto all'antimateria in un'epoca ancora più antica (vedi capitolo 9). Se ciò non si fosse verificato, tutta la materia si sarebbe annichilita con un'uguale quantità di antimateria, dando luogo a un universo che

non avrebbe contenuto alcun atomo. E allora non ci sarebbero state stelle, né ci sarebbe stata la chimica, né quelle complesse strutture che la chimica permette di creare.

La perversità termica della gravità

La *gravità* è ancora più cruciale. Immaginiamoci un universo che si stia espandendo alla stessa velocità del nostro, ma in cui l'interuttore della gravità sia stato spento. Niente perturberebbe, allora, l'uniformità della materia, che oggi sarebbe, dopo 10-20 miliardi di anni, un gas freddo e rarefatto espanso per tutto lo spazio. È la gravità che rende instabili gli universi uniformi e che permette che si sviluppino ampi contrasti di densità a partire da piccole irregolarità iniziali (vedi capitolo 7). È così che vaste nubi di gas protogalattiche si sono potute separare e frammentare in stelle.

La gravità ha un'influenza dominante sulle stesse stelle. Queste hanno la proprietà, apparentemente bizzarra, di *riscaldarsi* quando *perdono* energia. Supponiamo che il rifornimento di combustibile che si trova nel centro del Sole venga interrotto. Il calore continuerebbe a fluire fuori, e a essere irraggiato all'esterno dalla superficie. Se la fusione nucleare non rigenerasse questa energia dispersa, il Sole dovrebbe contrarsi. Ma si ritroverebbe, allora, con un centro *più caldo* di prima. Infatti, per stabilire un nuovo e più compatto equilibrio in cui la pressione centrale sia abbastanza alta da controbilanciare una forza gravitazionale divenuta più intensa, la temperatura interna deve salire. Chiunque abbia studiato un po' di fisica a scuola (specie se l'insegnamento era di vecchio stile) avrà misurato il "calore specifico" di un pezzo di metallo infilandolo in acqua calda e notando come il termometro scenda via via che il metallo risucchia calore dall'acqua. Le stelle (e, se è per questo, tutti gli oggetti tenuti insieme dalla gravità) hanno un calore specifico *negativo*: per scaldarsi hanno bisogno di perdere – e non di acquistare – energia.

La gravità produce effetti controintuitivi anche quando un

satellite che si trova in un'orbita bassa subisce l'attrito dell'atmosfera. Cade a spirale e finisce col bruciarsi: ma in questo moto la sua velocità orbitale *cresce* (un satellite in un'orbita più bassa avverte maggiormente l'attrazione gravitazionale della Terra e si muove più velocemente). Soltanto metà della sua energia viene dissipata in calore; l'altra metà lo fa accelerare.

Se i sistemi sono abbastanza pesanti da autogravitare, lo scostamento dall'equilibrio *aumenta*. Il nostro universo si è così potuto evolvere, del tutto coerentemente con i dettati della termodinamica, da una palla di fuoco primordiale – calda, ma non *uniformemente* calda – fino a raggiungere uno stato strutturato che contiene stelle caldissime che irraggiano in uno spazio vuoto freddissimo. Col procedere dell'espansione universale, le disparità di densità si fanno sempre più cospicue. Le singole stelle diventano più dense via via che si evolvono (alcune finiscono col diventare stelle di neutroni o buchi neri), mentre la materia nel suo complesso diventa sempre più rarefatta.

Ci è familiare l'idea che l'"ordine" nella biosfera terrestre sia emerso perché la luce solare fornisce energia agli elaborati processi chimici (la fotosintesi) che permettono alle piante di crescere. Il Sole emette energia "di alto livello". Questa viene utilizzata sulla Terra, che è più fredda, e i "rifiuti" termici del processo vengono dispersi nello spazio, che è ancora più freddo. Questi contrasti di temperatura – che sono un prerequisito per l'emergere della complessità – sono il risultato naturale di una catena di eventi che risale fino al mezzo primordiale, ultradenso e quasi completamente amorfo e privo di struttura.

Questi inizi sono, ovviamente, ancora misteriosi, ma non è un mistero che la dominanza della gravità su vasta scala possa, almeno in linea di principio, condurre alla formazione delle strutture differenziate che vediamo oggi. E che questa dominanza costruisca il palcoscenico su cui va in scena l'intricata evoluzione del Cosmo e l'emergere di sistemi autorganizzati, di cui noi stessi siamo un esempio. Occorrono solo due cose. Primo, che nell'universo primordiale siano state presenti piccolissime irregolarità (che potrebbero anche non essere state niente di più che le microscopiche vibrazioni richieste dalla meccanica quantistica), in modo da dare inizio a instabilità gravitazionali e al processo di condensazione. Secondo, ci devono essere sistemi biochimici capaci di assorbire energia dalle regioni calde, trattarla, e irraggiarla di nuovo a temperature più basse.

Il Big Brunch: la grande collisione

Se il nostro universo si ricontraesse, l'equilibrio termico non verrebbe restaurato fino a che ogni cosa non fosse nuovamente compressa fino a una densità così elevata che tutto diverrebbe opaco. Non si vede il motivo perché, prima che si raggiunga quello stadio, le frecce del tempo locali dovrebbero risultare influenzate dall'inversione dell'espansione. Se questa si verificasse in un'epoca in cui non tutte le stelle fossero ancora morte, con la contrazione dell'universo i nostri remoti discendenti potrebbero trovarsi in un mondo in cui la freccia del tempo cosmica e quella locale punterebbero in direzioni opposte. D'altra parte, se il collasso fosse rinviato di un tempo enormemente maggiore di dieci miliardi di anni, non solo tutte le stelle sarebbero morte, ma tutti gli atomi e tutti i buchi neri si sarebbero dissolti in radiazione. E si potrebbe scommettere con una certa sicurezza che un osservatore qualsivoglia vedrà, comunque, un universo in espansione.

La freccia del tempo non potrebbe essere ancor più intimamente legata all'espansione? Le equazioni dell'elettricità e del magnetismo appaiono simmetriche rispetto al passato e al futuro – di per sé, esse non ci dicono perché la radiazione si diffonda verso l'esterno invece di convergere all'interno. Alcuni cosmologi, seguendo i lavori pionieristici di Richard Feynman e di John Wheeler, hanno suggerito che sia l'espansione cosmica a indurre questa asimmetria, perché – per usare il gergo tecnico – le *condizioni al contorno* sono diverse nel futuro e nel passato. Ciò non darebbe luogo a nessun paradosso

in un universo in perpetua espansione. Ma se ci trovassimo in un universo finito e chiuso, non ci sarebbe nessuna freccia del tempo globale che puntasse dal "bang" al "crunch", dall'esplosione iniziale alla strizzata finale. La freccia del tempo, invece, potrebbe puntare nella direzione in cui l'universo si allarga, per invertirsi nel momento dell'inizio della contrazione.

Se la direzione del tempo psicologico si invertisse anch'essa in un universo in contrazione, qualsiasi essere cosciente percepirebbe, ovviamente, un universo in apparente espansione, esattamente come noi. Negli anni Ottanta Hawking resuscitò per breve tempo quest'idea. I suoi tentativi di applicare la teoria dei quanti all'universo intero lo portarono a immaginare un "ciclo" chiuso in cui gli stati finali e iniziali si trovano sullo stesso piano. A un primo esame ciò sembrerebbe comportare un'inversione della freccia del tempo al momento del dietro-front; ma il suo collega Don Page sottolineò un fatto importante (sul quale lo stesso Hawking, in seguito, ammise di essersi sbagliato): la simmetria temporale si applica all'insieme degli universi, non a un particolare membro della collezione.

Per affascinante che possa sembrare questa prospettiva, non pare che si guadagni un granché a congetturare che la freccia del tempo si inverta nell'istante del dietro-front. Se il nostro universo arrestasse la sua espansione e cominciasse a collassare, niente di particolarmente drastico, anzi niente di immediatamente discernibile segnalerebbe il momento. Le galassie vicine comincerebbero a esibire uno spostamento verso il blu, ma le galassie lontane continuerebbero ad apparire spostate verso il rosso fintanto che continuassimo a ricevere luce emessa molto tempo prima del dietro-front.

Penrose pensa che la freccia del tempo sia orientata dalla differenza fra la dinamica del Big Bang e quella del Big Crunch. Il nostro universo è emerso dal Big Bang in uno stato sorprendentemente omogeneo. Il *crunch*[2] risulterebbe, invece, molto più caotico e meno sincronizzato – in effetti, le regioni che sono già collassate in buchi neri sono, di fatto, dei precursori del Big Crunch. Penrose suggerisce che, in un universo chiuso in

cui le singolarità alle due estremità del tempo siano diverse, la freccia del tempo punti dalla singolarità semplice verso quella più complicata.

Tempo lento e tempo veloce

Anche se la "freccia del tempo" sembra sempre puntare nella stessa direzione, il tempo non scorre sempre con la stessa velocità. L'esempio più famoso è il cosiddetto "paradosso dei gemelli" di Einstein. Il gemello che fa un viaggio lungo e molto veloce quando torna è meno invecchiato di quello che se ne è rimasto a casa. In realtà questo non è un vero "paradosso": si tratta solo di un fenomeno sorprendente perché richiede per il suo verificarsi condizioni assai remote dall'esperienza quotidiana che ha modellato il nostro senso comune. Tutti gli sperimentatori (usando i loro orologi) misurano la stessa velocità della luce, indipendentemente da come si stanno muovendo. Che gli orologi che viaggiano ad alta velocità rallentino il loro battito è una conseguenza necessaria di questo fatto che, per essere assai notevole, non per questo è meno bene attestato.

Questa dilatazione del tempo diventa arbitrariamente grande per velocità che si approssimano a quella della luce. Per inciso, notiamo che una conseguenza di questo fatto è che non ci sono limiti a quanto lontano vi possiate spingere nel corso della vostra vita, se accelerate fino ad avvicinarvi abbastanza alla velocità della luce. Tuttavia, se vi faceste un viaggetto di un miliardo di anni luce e poi tornaste indietro, per quanto giovani vi potreste sentire, a casa vostra sarebbero comunque passati almeno due miliardi di anni: la relatività non permette velocità superiori a quelle della luce rispetto agli orologi che se ne stanno fermi a casa loro.

Il tempo viene "sforzato" [*stretched*] anche quando la gravità è molto forte (come abbiamo detto nel capitolo 5). Gli orologi che si trovassero su una stella di neutroni apparirebbero a un osservatore lontano come se andassero indietro del

20-30 per cento. Gli orologi in orbite molto vicine a un buco nero ruotante (o in particolari traiettorie al suo interno) potrebbero esibire una dilatazione temporale arbitrariamente grande; inversamente, un osservatore che si trovasse in una tale orbita potrebbe vedere l'universo esterno *accelerato* di un fattore per il quale non esistono limiti ben sicuri.

Le differenze fra la velocità del tic-tac di orologi che si trovano in luoghi diversi o che si muovono a velocità diverse sono ovviamente assai malamente discernibili nella vita quotidiana, in cui la gravità è debole e i movimenti sono estremamente lenti rispetto alla velocità della luce. Un aereo vola a un milionesimo della velocità della luce. Gli effetti previsti dalla teoria sono stati registrati in orologi molto precisi trasportati da aerei o missili. Potreste allungarvi la vita di circa un millisecondo se passaste tutto il vostro tempo a volare intorno al mondo da occidente verso oriente.[3]

Ma non ci sarebbe niente di profondamente paradossale se tali effetti fossero maggiori. Nel romanzo breve *Einstein's Dreams* (*I sogni di Einstein*) Alan Lightman, che è anche un astrofisico, fantastica su distorsioni temporali nella vita quotidiana:

> C'è un posto dove il tempo sta fermo [...]. Quando il viandante gli si avvicina, lungo un qualunque sentiero, si muove sempre più lentamente. Fra un battito e l'altro del suo cuore passa sempre più tempo, il respiro rallenta, la sua temperatura cala, i pensieri si fanno sempre più radi. E infine arriva a quel centro morto e si ferma. Da quel punto il tempo si irradia fuori in cerchi concentrici – è in quiete, in quel centro, e va lentamente prendendo velocità a distanze più grandi.

Inversioni e lacci nel tempo

I fisici speculano a proposito di ipotetiche particelle dette *tachioni* che potrebbero viaggiare più veloci della luce. Tali particelle sarebbero innocue se non interagissero con la mate-

ria ordinaria, ma in tal caso non avrebbero interesse alcuno perché non potrebbero (nemmeno in linea di principio) trasmettere alcun segnale. D'altra parte, se i tachioni *potessero* inviare segnali più veloci della luce ci troveremmo di fronte a seri paradossi. La teoria einsteiniana ci insegna come passare da un sistema di riferimento a un altro. Un segnale tachionico, visto da certi sistemi di riferimento, sembrerebbe arrivare *prima* di essere stato emesso. Il che solleva i paradossi delle "macchine del tempo".

Ogni alterazione dell'*ordine* degli eventi (e non solo della velocità con cui avvengono) sarebbe profondamente paradossale. Se fosse possibile seguire un "laccio temporale" [*time loop*], un cammino chiuso che ti faccia ritornare nel tuo passato, salterebbero fuori ovvi problemi a proposito della causalità e del libero arbitrio. Forse andare a caccia di dinosauri potrebbe anche non portare a nessuna contraddizione, ma strangolare la propria nonna quando è ancora in fasce creerebbe non solo problemi morali, ma anche causali. Nel romanzo di Isaac Asimov *La fine dell'eternità*, incoerenze simili vengono represse dalla "polizia temporale". Il viaggiatore nel tempo degli *Einstein's Dreams* di Lightman è una figura patetica: "Se alterasse la benché minima cosa, potrebbe distruggere il futuro [...]: è un esiliato nel tempo".

Le intuizioni del senso comune si basano sulla nostra esperienza relativa a scale spaziali e a intervalli temporali "ordinari". Siamo pronti ad accettare che su scala atomica sia tutto molto diverso: che ci potrebbe essere di meno "intuitivo" della meccanica quantistica? E su scale ancora più piccole, come abbiamo già detto, lo spazio e il tempo potrebbero essere rimescolati e agitati insieme in modi che non possiamo ancora nemmeno immaginare. Come possiamo dunque fidarci a escludere che su scale piccolissime non sia possibile "viaggiare" nel tempo?

Le "piegature dello spazio" [*spacewarp*], care alla fantascienza, permettono il teletrasporto istantaneo a grandi distanze. Ma i viaggi più veloci della luce portano agli stessi problemi dei tachioni: in alcuni sistemi di riferimento si ve-

drebbe il viaggiatore che "arriva" prima di essere "partito". In altre parole, se potete piegare lo spazio, potete anche costruirvi una macchina del tempo. Il concetto fisico che più si avvicina a quello di piegatura dello spazio è il cosiddetto *wormhole*, un "cunicolo" che connetterebbe – quasi un cordone ombelicale – un buco nero con un lontanissimo "buco bianco". Kip Thorne, Igor Novikov e i loro collaboratori hanno esplorato idee del genere prendendole molto sul serio. Un problema centrale è se le estremità del *wormhole* si richiudano o meno prima che qualcosa riesca ad attraversare tutto il cunicolo. Questi ricercatori hanno dimostrato che non c'è alcuna possibilità di tenere aperto un *wormhole,* a meno che esso non sia fatto di materia dotata di proprietà molto esotiche: dovrebbe avere una pressione negativa – una tensione, in altre parole – molto alta. Roba di questo genere potrebbe essere esistita nell'universo ultraprimordiale con le sue enormi energie.[4]

Nessuno ha sin qui dimostrato con tutto rigore che sia completamente impossibile creare, nel nostro universo attuale, quel tipo di piegatura dello spazio-tempo che permetterebbe i viaggi nel tempo. Ma anche se non sono assolutamente vietate, le macchine del tempo avrebbero evidentemente bisogno di espedienti tecnologici ben al di là dell'immaginazione di H.G. Wells, il cui viaggiatore nel tempo, anno 1895, appariva come "una figura indistinta, fantasmatica, seduta su una massa vorticante di ferraglie".

Potrebbero esistere lacci temporali chiusi su qualche scala microscopica? Le macchine del tempo sarebbero poi tanto più strane di altri strani paradossi del Paese dei Quanti? L'ingegnosità dei teorici, anche qui, non è riuscita a stabilire se i *wormhole* siano solo tecnicamente irrealizzabili (come, per esempio, è tecnicamente irrealizzabile un'astronave "a dilatazione temporale" [*time-stretching*], che si muova al 99,9 per cento della velocità della luce) o se invece ci sia qualche legge fondamentale che li vieti assolutamente, anche se esistesse la materia dotata dell'alta tensione necessaria per fabbricare un *wormhole*. Questi problemi non sono certo problemi risolti,

ma personalmente inclino verso la seconda alternativa e tendo a credere che la fisica abbia quel tipo di integrità interna che vieterebbe i viaggi nel passato. Ciò che Hawking ha battezzato "la congettura di protezione cronologica" non solo "renderebbe il mondo un posto sicuro per gli storici" e ci proteggerebbe da turisti venuti dal futuro; se fosse valida, precluderebbe le macchine del tempo (macro o microscopiche) *anche in linea di principio.*

Lacci temporali che si estendano per tutta l'estensione dell'universo sono stati discussi per la prima volta quasi cinquant'anni fa. Il grande logico e matematico Kurt Gödel divenne famoso mostrando che, anche in un sistema formale semplice come l'aritmetica, si possono formulare enunciati di cui è impossibile dimostrare la verità o la falsità all'interno di quel sistema. Quando Einstein era ormai ai suoi ultimi anni, Gödel divenne suo intimo amico: lavoravano entrambi all'Institute for Advanced Study di Princeton. (Gödel era una figura molto più bizzarra ed eccentrica dello stesso Einstein. Quando fece domanda per ottenere la cittadinanza americana, l'impresa rischiò di naufragare perché lui si mise a criticare pretese manchevolezze della Costituzione degli Stati Uniti; finì col morire di malnutrizione perché sospettava che il suo cibo venisse avvelenato.)

Gödel prese a interessarsi profondamente di relatività e scoprì (inventò?) un universo possibile che obbediva alle equazioni di Einstein e conteneva lacci chiusi nel tempo. L'universo di Gödel non ha molto a che vedere col nostro; tanto per cominciare, non si espande. Ma ciò solleva un altro problema: potrebbe esistere un universo, che somigli al nostro in quanto contiene stelle e galassie, ma in cui ci siano lacci temporali chiusi? Se ci volessero miliardi di anni per compiere tutto il cammino, allora non ci sarebbe alcun conflitto con ciò di cui facciamo esperienza quotidiana, e neanche (forse) con ciò che gli astronomi possono osservare. Più di recente, Richard Gott ha proposto un altro tipo di universo che contiene lacci temporali. L'universo di Gott contiene solo due stringhe

cosmiche infinite (vedi capitolo 11) che si muovono velocemente una rispetto all'altra, ed è altrimenti vuoto.

Il nostro universo non permetterebbe i viaggi nel tempo a meno che non possa venir creato il necessario *wormhole*: ma anche in questo caso non potremmo viaggiare nel passato oltre il momento in cui fu fabbricato il *wormhole*. L'universo di Gödel e quello di Gott, invece, sarebbero stati sempre "piegati" in modo tale da permettere il viaggio nel tempo. Chiunque percorra un laccio temporale per intero farebbe esperienza di una storia che si richiude su se stessa in modo autocoerente. I problemi filosofici sull'esistenza del libero arbitrio che cose del genere sollevano sarebbero dunque sempre esistiti negli universi di Gödel e di Gott.

Che atteggiamento assumere di fronte a questi scenari? Forse, il loro carattere paradossale ci dovrebbe far tendere alla ricerca di qualche nuova e più restrittiva legge che escluda queste poco piacevoli caratteristiche. (Il che richiama l'atteggiamento di quelli che vorrebbero eliminare le soluzioni delle equazioni di Einstein che sono incompatibili con il principio di Mach: vedi capitolo 12.) D'altro canto, ci si può limitare a notare che questi cammini chiusi non darebbero luogo a nessuna ovvia assurdità in un mondo fisico in cui una "polizia temporale" assicurasse che tutto si richiuda in modo autocoerente ogni volta che si fa un giro completo del cammino. Nondimeno, per la maggior parte i fisici condividerebbero probabilmente l'idea (che forse è solo un pregiudizio conservatore) che qualche profondo principio che ancora non comprendiamo salvaguardi la natura da qualsiasi cosa violi il normale ordinamento fra causa ed effetto.

Fluttuazioni, eterno ritorno e duplicazione

Abbiamo già notato che l'espansione cosmica definisce una freccia del tempo. Per contro, un sistema chiuso, finito, permanentemente isolato, su cui non agisca la gravità si assesta all'equilibrio: non ci sarebbe nessun cambiamento globa-

le, nessuna tendenza complessiva che scegliesse per il tempo una direzione particolare. Il grande fisico ottocentesco Ludwig Boltzmann si domandava come avrebbe mai potuto emergere da un universo del genere la scena cosmica che di fatto possiamo contemplare. (Ciò avveniva prima che si sapesse dell'esistenza delle galassie esterne. L'"universo" di Boltzmann era dunque un aggregato di stelle non più grande della nostra Via Lattea.) Il fisico austriaco fu portato a postulare che tutto ciò che appariva a portata dei nostri telescopi rappresentasse una fluttuazione incredibilmente rara di un cosmo eterno e infinito. Ma anche volendo accettare i suoi stessi presupposti, si trattava di una teoria insoddisfacente. La nostra esistenza potrà anche richiedere una fluttuazione delle dimensioni del sistema solare, ma non ci sarebbe ragione perché la fluttuazione si estenda fin dove gli astronomi possono vedere nelle profondità dello spazio. Boltzmann avrebbe meglio concluso se avesse detto che il suo cervello riceveva degli stimoli coordinati in modo da dargli l'illusione dell'esistenza di un mondo esterno coerente che, in realtà, non esiste. Il punto di vista solipsistico sarebbe di un bel po' meno improbabile che l'emergere dell'intero mondo esterno al soggetto a partire da una fluttuazione casuale!

L'espansione del cosmo risolve facilmente altri paradossi che saltano fuori negli universi statici. All'inizio di questo secolo Henri Poincaré osservò che ogni sistema chiuso ritorna (anzi, ritorna infinite volte) al suo stato attuale; e, se Boltzmann avesse avuto ragione, ciò sarebbe dovuto accadere anche all'intero universo osservabile. Ma il cosiddetto "tempo di ricorrenza di Poincaré" è *immensamente* lungo, anche in rapporto alle scale temporali cosmologiche: già solo per i sistemi microscopici occorrerebbe un arco di dieci miliardi di anni perché possano ripetersi.[5] Ma se il nostro universo continuasse a espandersi per sempre, non potrebbe esserci abbastanza tempo per una ricorrenza completa? La risposta sarebbe però affermativa solo per un sistema di dimensione fissa. In un universo in espansione, tuttavia, la quantità di materia

in connessione causale con un dato elemento di massa cresce indefinitamente.

Un universo infinito potrebbe contenere dei "duplicati" di noi stessi, che avrebbero seguito un'evoluzione esattamente parallela per dieci miliardi di anni. Questi signori si troverebbero però ben al di là dell'attuale orizzonte delle osservazioni. La luce proveniente da questi duplicati potrebbe anche finire col raggiungerci. Ma anche se la loro storia avesse mimato la nostra per i dieci miliardi di anni trascorsi, non c'è alcun motivo perché continui a "tallonare" la nostra evoluzione anche nel futuro remoto. Da qui ad allora ci sarà stato assai più tempo perché si sviluppi una diversità. Sistemi la cui intera storia si sia dipanata parallelamente alla nostra possono anche esistere, ma si andrebbero facendo sempre più dispersi: il nostro "duplicato" più vicino si troverebbe sempre più lontano nei territori posti oltre i limiti del nostro orizzonte.

NOTE

1. Alcuni autori, per esempio il versatile fisico russo Vitaly Ginzburg, congetturano che possa esistere qualche altra barriera nel tempo, persino prima di avvicinarsi al tempo di Planck. Teorie come quella delle superstringhe suggeriscono l'esistenza nello spazio-tempo di una struttura reticolare fondamentale collocata su una scala di 10^{-43} secondi. Tutto ciò che sappiamo dalla sperimentazione diretta, però, è che tale scala non può superare i 10^{-26} secondi.

2. È utile immaginare un "diagramma spazio-temporale" in cui i tempi successivi rappresentano sezioni orizzontali, collocate sempre più in alto per i tempi più lontani nel futuro. Le "linee di universo" o "cosmolinee" degli oggetti nell'universo puntano dritte verso l'alto. Se rappresentiamo graficamente solo due (invece delle tre usuali) dimensioni spaziali, il Big Bang sarebbe rappresentato da un "pavimento" liscio posto sul fondo. Ma il *crunch* sarebbe una superficie molto sconnessa: alcune parti arriverebbero molto in basso, e rappresenterebbero le porzioni dell'universo collassate in buchi neri in epoche primordiali. Il quadro complessivo assomiglierebbe a una caverna con un fondo liscio (senza stalagmiti) ma con molte stalattiti che pendono dalla volta.

3. Per gli orologi sulla superficie (o nei suoi immediati dintorni) della Terra la situazione è resa un po' più complicata dalla gravità e dalla rotazione terrestre. È questo il motivo per cui l'effetto non sarebbe identico se viaggiaste da est verso ovest.

4. L'inflazione discussa nel capitolo 10 richiede, come si è visto, che il contenuto dell'universo primordiale si comportasse come se avesse una tensione.

5. Il tempo di ricorrenza per un qualcosa della taglia di un essere umano è così enorme che richiederebbe, scrivendo mille zeri per pagina, una massa di libri con un volume pari all'incirca a quello della Luna!

14

"COINCIDENZE" COSMICHE ED ECOLOGIA DEGLI UNIVERSI

Gli universi [...] potrebbero essere stati rabberciati e rimpasticciati per tutta un'eternità prima che questo sistema venisse architettato; molta fatica sprecata, molti tentativi andati a vuoto, e un lento ma continuo miglioramento sviluppato nel corso di ere infinite nell'arte di fabbricare mondi.

DAVID HUME (1779)

Quanto sono costanti le costanti?

Rimarremmo di stucco se gli atomi avessero un comportamento diverso in qualche altra parte del mondo, o se lo cambiassero da un anno all'altro. Il preconcetto che la fisica sia la stessa ovunque è così profondamente radicato che tendiamo a dimenticarci che questa pretesa universalità deriva solo dalla nostra esperienza. Le leggi fondamentali sembrano le stesse non solo in ogni luogo della Terra ma anche (per quanto possiamo giudicare) in ogni parte dell'universo che possiamo osservare. Le galassie lontane contengono ossigeno, sodio e altri atomi, che emettono luce che ha esattamente lo stesso colore di quella emessa da quegli stessi atomi nei nostri laboratori di spettroscopia. (Naturalmente, dobbiamo correggere lo spostamento verso il rosso, che modifica tutte le lunghezze d'onda negli stessi rapporti.)

L'intero mondo fisico – non solo gli atomi, ma le stelle e anche le persone – è essenzialmente determinato da poche "co-

stanti" fondamentali: le masse di alcune particelle cosiddette elementari, e le intensità delle forze – elettromagnetica, nucleare e gravitazionale – che le tengono unite e che governano i loro moti.

I valori numerici di queste quantità dipendono da quali unità vengono scelte per misurarle. Ma l'asserzione che, per esempio, un oggetto è dieci volte più pesante di un altro rimane vera sia che misuriamo la massa in grammi oppure in once. I *rapporti*, fra due masse o fra due prezzi, non dipendono dalla scelta delle unità di misura o della valuta, e sono quindi più significativi. Un rapporto di questo genere è quello fra la massa del protone e quella dell'elettrone, due degli elementi costitutivi degli atomi: è pari a 1836. Anche le *dimensioni* degli atomi sono importanti. Sono determinate da quanto le orbite degli elettroni (dotati di carica negativa) siano vicine al nucleo centrale (positivamente carico, a causa dei protoni che vi si trovano). Queste dimensioni dipendono da quanta indeterminazione introducono gli effetti quantistici. Il numero fondamentale qui è noto come la "costante di struttura fine", che ci dice quanto gli atomi devono essere più grandi (a causa del principio di indeterminazione quantistico) degli elettroni.

Le "costanti fisiche" fondamentali, come gli atomi e gli elettroni stessi, sono eredità dell'universo primordiale. Sarebbero state impresse nei primissimi istanti, forse quando il nostro universo aveva anche meno di 10^{-36} secondi. Le condizioni erano allora così estreme che gli esperimenti non possono offrirci alcuna guida. Qualsiasi principio soggiacente che colleghi fra loro questi numeri apparentemente arbitrari – ammesso che un tale principio esista – richiederà sicuramente nuove intuizioni su come ebbe inizio il nostro universo.

Le forze cambiano?

Einstein credeva che la gravità fosse genuinamente universale e che la sua intensità non cambiasse col tempo. Ma altri hanno sostenuto che, al contrario, ci sarebbe da stupirsi che le

leggi fisiche *non* cambino in un universo che cambia. Come possiamo essere sicuri che le "costanti" siano *rimaste* davvero costanti per tutto questo tempo – dieci miliardi (10^{10}) di anni – durante il quale il nostro universo non ha fatto altro che cambiare?

Il fisico matematico Paul Dirac diede i suoi maggiori contributi alla scienza prima di compiere i trent'anni, durante l'età eroica della teoria dei quanti, fra il 1925 e il 1930. In seguito, però, cominciò a interessarsi di cosmologia e nel 1937 propose che la gravità si indebolisse via via che l'universo invecchiava. Ogni cambiamento del genere avrebbe avuto un effetto minuscolo – non superiore a un miliardesimo all'anno – cosa che né il senso comune, né l'esperienza quotidiana potrebbe escludere *a priori*. All'epoca l'idea di Dirac non poteva essere sottoposta a controllo sperimentale, ma oggi la possiamo controllare grazie a misurazioni esatte. Se la gravità cambiasse, le orbite dei pianeti e delle sonde spaziali ne sarebbero leggermente influenzate. I pianeti si muoverebbero a spirale verso l'esterno via via che la presa gravitazionale del Sole si andasse indebolendo; l'effetto cumulativo potrebbe essere rilevabile anche nell'arco di pochi anni, se le orbite potessero essere seguite con sufficiente accuratezza. Un accurato monitoraggio della sonda Viking inviata dalla NASA verso Marte ha mostrato che la gravità non può cambiare per più di $3/10^{11}$ all'anno; il che confuta l'ipotesi di Dirac, anche se un indebolimento ancora più lento (per esempio, di un decimo del tasso di diminuzione previsto da Dirac) non può essere escluso.

Se la gravità fosse stata più forte nel passato, il nucleo del Sole sarebbe stato strizzato da una pressione maggiore. Avrebbe allora brillato nel cielo molto più caldo e luminoso, facendo bollire gli oceani della Terra ancora giovinetta, e avrebbe consumato il suo combustibile nucleare più velocemente. La stessa cosa sarebbe accaduta a tutte le stelle di ogni galassia. Le galassie lontane, la cui luce fu emessa quando l'universo era più giovane, sarebbero di conseguenza più luminose di quanto altrimenti ci si aspetterebbe.[1] Niente di simile è stato finora osservato: le galassie giovani appaiono sì diver-

se, ma solo nella misura prevista dal fatto che le loro stelle si trovano in uno stadio evolutivo più precoce e che il "riciclaggio" fra il gas interstellare e le stelle stesse è stato meno spinto che nelle galassie più vecchie. Tuttavia, le conclusioni sulla gravità che si possono trarre da tali osservazioni sono meno nette di quelle che possiamo inferire dalle orbite del nostro sistema solare, che sono molto più semplici da calcolare.

I test più precisi di tutti, però, ci vengono dalle pulsar, stelle di neutroni la cui velocità di rotazione fornisce un orologio di precisione. Alcune pulsar orbitano intorno a una stella compagna. Siccome si può prendere il tempo di una pulsar con grande precisione, queste orbite possono essere misurate con altrettanta accuratezza di quelle dei pianeti o delle sonde spaziali nel sistema solare. Se la gravità si andasse indebolendo, una pulsar tenderebbe a muoversi verso l'esterno della sua orbita e a trovarsi al di là della posizione prevista. Questa tecnica offre oggi una prova della costanza della gravità persino più forte di quelle che possiamo ottenere restando all'interno del nostro sistema. (Abbiamo già parlato delle misurazioni ad alta precisione delle pulsar nei sistemi binari nel capitolo 4.)

Gravità a parte, ci si potrebbe però chiedere se gli altri numeri fondamentali che governano il micromondo – per esempio le masse del protone e dell'elettrone, o le intensità delle forze elettromagnetiche e nucleari – siano rimasti costanti. Non potrebbero essere stati diversi nel passato? Non potrebbero differire lievemente da luogo a luogo, di modo che la luce che ci arriva da una galassia distante miliardi di anni luce sia diversa da quella di una fiamma sulla Terra o da quella del Sole?

Quando si analizza la luce proveniente dalle galassie e dai quasar, tutte le linee spettrali risultano spostate verso il rosso dello stesso fattore. Scomputando lo spostamento verso il rosso, questi atomi e queste molecole, remote nello spazio e nel tempo, sembrano identiche a quelle dei nostri laboratori. Ma se i protoni, che qui e ora pesano 1836 volte di più degli elettroni, avessero laggiù, in quel passato, una massa diversa, allo-

ra le linee spettrali dell'idrogeno dovrebbero risultare leggermente spostate *rispetto a quelle* degli altri atomi.[2]

Alcune fra le prove più convincenti sui valori di queste costanti nel passato lontano ci vien fornita (sorprendentemente) non da osservazioni astronomiche di oggetti remoti ma da inferenze dei geologi sulle condizioni passate della nostra Terra. Nella miniera di uranio di Oklo, nel Gabon (Africa Occidentale) si trovano vari elementi e isotopi[3] in rapporti fuori dal comune. I geologi ne inferiscono che, per un qualche motivo, in questo sito si debba essere accumulato dell'uranio arricchito che, mescolandosi con l'acqua del mare, formò un *reattore nucleare naturale* che raggiunse lo "stato critico" circa due miliardi di anni fa. Questo reattore rivela gli effetti del decadimento radioattivo nel passato remoto. Il samario, un elemento raro, è particolarmente interessante, perché uno dei suoi isotopi ha una propensione anomalmente alta a risucchiare i neutroni prodotti dalla radioattività; di conseguenza, non sopravvive a una prolungata esposizione all'ambiente di un reattore. I campioni della miniera di Oklo, in realtà, contengono ben poche tracce di questo isotopo. Il che significa che le forze fondamentali che tengono uniti i nuclei – l'interazione forte e la forza elettromagnetica – ben difficilmente possono essere mutate nel corso degli ultimi due miliardi di anni. Altrimenti, l'isotopo del samario non dovrebbe aver avuto, durante la maggior parte della sua storia, una probabilità così particolarmente alta di andare distrutto. Questa limitazione è particolarmente stringente, perché il samario perderebbe le sue inusuali proprietà se il suo nucleo mutasse anche solo di pochissimo in un miliardo. Nell'arco di due miliardi di anni non può essere avvenuto nemmeno un cambiamento così piccolo. Le forze elettriche non possono essere cambiate per più di qualche 10^{17}esimo all'anno. I cambiamenti delle forze subatomiche, quindi, hanno dei limiti ancora più stretti di quelli della gravità.

Di conseguenza, nessuna delle forze fondamentali, e nemmeno le masse delle particelle subatomiche, possono essere cambiate sostanzialmente, nemmeno nel corso di svariati mi-

liardi di anni. Naturalmente, non si possono escludere cambiamenti estremamente piccoli. Nelle teorie delle superstringhe (vedi capitolo 9) le masse delle particelle sono correlate alle strutture delle dimensioni spaziali che sono state "arrotolate"; e queste potrebbero lievemente cambiare rispondendo all'espansione del cosmo. I fenomeni chiave delle teorie delle superstringhe si collocano su scale molto più piccole di qualsiasi particella conosciuta. Le prospettive di poter controllare direttamente tali teorie sono piuttosto scarse, e così i test indiretti forniscono un'ulteriore motivazione per perseguire queste delicate ricerche di esili cambiamenti delle grandezze fisiche fondamentali.

Numeri grandi, gravità debole

Dirac aveva un interessante motivo per congetturare che la gravità si stia indebolendo. Aveva notato che le forze elettriche e gravitazionali obbediscono entrambe alla legge dell'inverso del quadrato. Di conseguenza, il rapporto fra le intensità della forza elettrica e gravitazionale che agiscono su un protone e un elettrone (per esempio) rappresenta un numero fondamentale. Questo numero è veramente enorme: 10^{39}. Dirac scoprì con sua sorpresa che la misura dell'universo osservabile (il cosiddetto raggio di Hubble) supera le dimensioni di un protone di un fattore che, grosso modo, è anch'esso 10^{39}. Inoltre, le sue stime del numero di atomi presenti nell'universo osservabile (e questa è una stima ancor più grossolana) gli davano un 10^{78}, cioè il quadrato del numero precedente. Riluttante a trattare queste somiglianze come mere coincidenze, congetturò che dovesse esistere un qualche legame nascosto fra questi numeri così grandi.[4]

Ora, se l'espansione del cosmo iniziò con un Big Bang, come Dirac credeva, le misure dell'universo, o il suo raggio di Hubble, crescono sicuramente via via che invecchia: essenzialmente sono date dalla velocità della luce moltiplicata per il tempo trascorso dal Big Bang a oggi. Così, uno dei numeri

di Dirac, il rapporto fra raggio di Hubble e la misura del protone, cresce con il tempo. Se quei numeri fossero effettivamente legati fra loro, allora anche il rapporto fra le intensità della forza elettrica e di quella gravitazionale dovrebbe crescere col tempo. Altrimenti, il fatto che due numeri enormi, apparentemente senza alcuna relazione, siano oggi uguali dovrebbe essere una pura coincidenza. Così, Dirac propose che la forza gravitazionale si indebolisse in modo inversamente proporzionale all'età dell'universo. (Dirac avrebbe potuto altrettanto bene sostenere che fosse invece la forza elettrica a diventare più intensa, ma riteneva più plausibile che fosse la gravità a essere sensibile al comportamento dell'universo su vasta scala.)

Come abbiamo già detto, se la gravità si stesse effettivamente indebolendo, i pianeti (o qualsiasi altro oggetto artificiale in orbita) dovrebbero gradualmente muoversi a spirale verso l'esterno, via via che il Sole allentasse la sua stretta. Le misure delle traiettorie dei satelliti sono abbastanza precise per escludere che la gravità cambi anche con la decima parte della velocità prevista da Dirac. Ma persino prima di avere questa evidenza, c'erano buone ragioni per mettere in discussione la base della sua congettura.

La risposta di Dicke a Dirac

Infatti, le "coincidenze" che tanto impressionavano Dirac sono in realtà illusorie. Abbiamo già parlato di Robert Dicke nel capitolo 3: fisico a Princeton, aveva predetto l'esistenza della radiazione cosmica di fondo e, con miglior fortuna, sarebbe forse riuscito a scoprirla prima che lo facessero Penzias e Wilson. Dicke riuscì a concepire le coincidenze notate da Dirac secondo un nuovo punto di vista. Aveva ben presente il fatto che in fisica esiste un numero molto grande: quello che si ottiene se si confronta la gravità con le forze che governano il micromondo degli atomi e delle particelle elementari. Il rapporto della forza elettrica e della forza gravitazionale fra due

protoni in una molecola di idrogeno è di circa 10^{36} (è 10^{3} volte più piccolo di quello di Dirac, perché si riferisce alle forze fra due protoni, invece che a quella fra un protone e un elettrone). Dunque, in una molecola la gravità è trascurabile, e con un margine enorme. Però, tutto esercita un'attrazione gravitazionale su tutto: non c'è una cancellazione di cariche positive e negative come avviene nel caso delle forze elettriche. È per questo che la gravità vince su scale sufficientemente grandi; e Dicke fu il primo a segnalare chiaramente come le proprietà delle stelle dipendano da questo numero così grande.

Immaginate di cominciare da una sola molecola, e poi di andare assemblando pezzi sempre più grandi contenenti prima 10, poi 100, poi 1000 atomi, e così via. Il ventiquattresimo pezzo che mettete insieme conterrà 10^{24} atomi e avrà le dimensioni di una zolletta di zucchero; il quarantesimo avrebbe le dimensioni di una montagna o di un piccolo asteroide. L'effetto della gravità su ogni atomo dipende dalla massa del blocco cui appartiene, divisa per il suo raggio. Cresce proporzionalmente al numero N degli atomi, ma è inversamente proporzionale alla distanza media che hanno uno dall'altro, e questa distanza è a sua volta proporzionale alla radice cubica di N se la densità è costante. In conclusione, l'effetto della gravità si comporta come $N/N^{1/3}$; in altre parole, come $N^{2/3}$, la radice cubica del quadrato di N. È come dire che se N aumenta di 1000 volte, la gravità aumenta di 100. Nonostante lo svantaggio iniziale, 10^{36} potenze di 10, la forza gravitazionale ha partita vinta quando si impacchettano insieme più di 10^{54} protoni: 36 infatti è i 2/3 di 54. E questa è all'incirca la massa di Giove. Qualsiasi cosa più grossa diventa una stella. È perché la gravità è tanto debole che una stella tipica come il Sole contiene ben 10^{57} atomi. In un qualsiasi aggregato più piccolo, la gravità non può comprimere la materia fino a ottenere nel centro quelle densità e pressioni che bastano a determinare la fusione nucleare.

Nello stesso spirito, Dicke poté stimare quanto a lungo vive una stella. Questo tempo è legato a quello che occorre a un fotone per essere diffuso su una traiettoria casuale fino a uscire fuori dalla stella, trasportandone via il calore interno. Esso è proporzionale al numero totale di passi del "cammino casuale" del fotone, che dipende dal *quadrato* del raggio (per un oggetto di data densità), e quindi dalla radice cubica del quadrato della massa: insomma, la durata della vita di una stella dipende dalla sua massa con la stessa legge con cui cresce l'energia gravitazionale che la tiene insieme. Il tempo che un fotone impiega a sfuggire a una stella, che è una misura di questa durata, è dunque 10^{36} volte più lungo del tempo che la luce impiega ad attraversare un atomo.

Perché si possano evolvere forme viventi simili a noi esseri umani ci deve essere il tempo perché le prime generazioni di stelle possano evolversi e morire, in modo da produrre gli elementi chimici; e poi ci deve essere il tempo perché il Sole si possa formare e l'evoluzione possa aver luogo in un pianeta in orbita intorno a lui. Tutto ciò richiede vari miliardi di anni. Riflettendo attentamente sui processi microscopici coinvolti in questa evoluzione, Dicke si rese conto che i tempi di vita delle stelle, così come le masse stellari, dipendono dal rapporto fra forza elettrica e gravitazionale. Quando il nostro universo arriva a essere vecchio quanto una stella, le sue dimensioni osservate, grossolanamente misurate dalla distanza che la luce ha potuto percorrere dalla sua nascita, saranno 10^{36} volte più grandi di quelle di un atomo. Poiché noi non stiamo osservando l'universo in un momento scelto a caso nella sua storia, ma *quando la sua età è all'incirca quella di una stella* – quando le stelle hanno avuto il tempo di formarsi e di evolversi ma non sono ancora tutte morte – troviamo che la "coincidenza di Dirac" risulta automaticamente soddisfatta.

Le dimensioni del nostro universo non dovrebbero sorprenderci: la sua stravagante scala è necessaria per assicurare alla vita *un tempo sufficiente* per evolversi su almeno un pianeta intorno ad almeno una stella in almeno una galassia.

È questo un esempio di ragionamento "antropico". Esso comporta la necessità di rendersi conto che il principio copernicano di modestia cosmica non deve venir spinto troppo in là. Siamo ormai riluttanti ad assegnarci una posizione centra-

le, ma sarebbe ugualmente irrealistico negare che la nostra situazione nello spazio e nel tempo è privilegiata, in un qualche senso. Chiaramente, non ci troviamo in un luogo generico, in un posto qualunque dell'universo: siamo su un pianeta con speciali proprietà, in orbita intorno a una stella stabile. Un po' meno banalmente, non stiamo osservando l'universo in un momento qualunque, scelto a caso, ma in un'epoca in cui le condizioni necessarie per l'evoluzione complessa possono venire soddisfatte. Ciò che Dicke mostrò fu che la somiglianza fra due grandi numeri, che per Dirac era tanto significativa, era *automaticamente garantita* nell'era del cosmo in cui noi possiamo esistere (e che sarebbe, poi, l'era più propizia per qualunque osservatore che Dicke riuscisse a immaginare).

Notiamo, fra parentesi, che Dirac reagì a questo argomento accettando l'idea che non ci sarebbe stata vita prima che ci fossero delle stelle, ma esprimendo la speranza che una qualche forma di vita possa continuare anche dopo che saranno tutte morte. Il che, in sé, non è un'aspirazione assurda (come abbiamo notato nel capitolo 12): ma non vale nulla come risposta agli argomenti di Dicke perché noi, evidentemente, apparteniamo a quello specifico tipo di vita che *dipende* dal calore di una stella.

Una deduzione bayesiana

Dicke propose la sua idea nel 1961. Avrebbe potuto, anche se non lo fece, trarne un argomento a favore del Big Bang e contro la teoria dello stato stazionario. (Quest'ultima all'epoca veniva ancora presa sul serio.) In ogni universo nato da un big bang ci sarà sempre uno stadio dell'evoluzione in cui la sua età uguagli quella di una sua stella tipica. Non dovremmo stupirci di stare osservando un universo siffatto in questo particolare stadio: noi siamo fatti di polvere di stelle, di resti di stelle morte, ma dipendiamo dal calore di una stella che arde ancora. Ma in un universo stazionario la scala temporale dell'espansione dell'universo (il tempo di Hubble) *è sempre la*

stessa. La fisica che determina il tempo di Hubble, per quanto sconosciuta, non dovrebbe aver nulla a che vedere con le stelle o con la loro evoluzione. Non c'è, quindi, nessuna ragione *a priori* perché in un universo stazionario la scala temporale dell'evoluzione stellare e il tempo di Hubble debbano essere in un qualche luogo all'incirca gli stessi: la vita stellare potrebbe essere molto più corta, nel qual caso quasi tutta la materia si troverebbe in stelle morte o in galassie ormai completamente consumate; o potrebbe essere, invece, molto più grande e allora solo una galassia eccezionalmente vecchia assomiglierebbe alla nostra. Il fatto che la vita delle stelle di tipo solare sia confrontabile con il tempo di Hubble sembrerebbe, allora, una coincidenza apparentemente improbabile per la teoria dello stato stazionario, mentre risulta del tutto naturale nel modello del Big Bang.

Questo tipo di ragionamento ha un reale valore di prova ogni volta che si cerca di confrontare le asserzioni di due teorie rivali: nell'esempio precedente la teoria del Big Bang (B) contro quella dello stato stazionario (S). La vostra opinione si potrebbe riflettere nella puntata che sareste disposti a rischiare volendo scommettere su quale delle due teorie alla fine "vincerà". Supponiamo che venga fuori un fatto nuovo che risulta del tutto naturale se B è corretta, ma sembrerebbe improbabile o una pura coincidenza in S. Allora, *quale che fosse la vostra puntata*, cambiereste gioco e puntereste su B (e se S dovesse proprio restare la vostra favorita, diminuireste la posta che siete disposti a rischiare). Questo metodo di inferenza scientifica viene detto "bayesiano", dal nome del reverendo Thomas Bayes, che lo inventò nel XVIII secolo.

Le costanti fisiche sono "sintonizzate" sulla vita?

L'idea secondo cui perché noi esseri umani si possa esistere occorrono condizioni speciali o una "sintonizzazione fine" ha una lunga storia. Risale fino al classico argomento teologico che sostiene l'esistenza di un Creatore intelligente (e persino

benigno). Il più famoso esponente di siffatti "argomenti del disegno" o "del progetto" fu William Paley, il cui libro *Natural Theology* (*Teologia naturale*), pubblicato nel 1802, introduceva la famosa analogia dell'orologio e l'orologiaio. Gli argomenti di Paley derivavano principalmente dalla biologia ("Prove dell'esistenza e degli attributi della Deità raccolti dalle apparenze della Natura") e, in un clima intellettuale postdarwiniano, rivestono oggi ben poco interesse – persino per i teologi. Il mondo inanimato, il Cosmo, impressionava Paley più che per la sua vastità, per il suo "disegno". Per citare le sue parole al riguardo: "La mia opinione sull'astronomia è sempre stata che essa non sia il miglior mezzo per provare l'azione e l'intervento di un intelligente Creatore; ma una volta che ciò sia stato provato, essa, più di tutte le altre scienze, mostra la magnificenza delle Sue operazioni".

Con uno spirito più scientifico, Lawrence Henderson, professore a Harvard all'inizio di questo secolo, scrisse due importanti libri seguendo questo filone: *The Fitness of the Environment* (*L'adattamento dell'ambiente*) (1913) e *The Order of Nature* (*L'ordine della natura*) (1917). Era rimasto impressionato soprattutto dalle proprietà, apparentemente sorprendenti, di alcune sostanze inorganiche che permettevano l'esistenza di condizioni particolarmente propizie per la vita. Per esempio, l'acqua ha la proprietà, assai poco comune fra i liquidi, di *espandersi* quando congela; in questo modo il ghiaccio galleggia, ed è per questo che è molto difficile che uno stagno si congeli solidificandosi completamente. Henderson notava che altre simili "anomalie" sono presenti in molecole importanti quali l'anidride carbonica. E ne concludeva che "siamo costretti, in un certo senso intelligibile, a considerare questa collezione di proprietà come una preparazione al processo dell'evoluzione planetaria. Le proprietà degli elementi devono dunque, per il momento, essere considerate come aventi un carattere teleologico".

Gli argomenti di Henderson riguardano la fisica e la chimica di base e non possono venir facilmente scartati come quelli di Paley sull'"adattamento" degli animali e delle piante al loro

ambiente. Qualsiasi ingegnosa e complessa architettura biologica è il risultato di una prolungata selezione evolutiva, che comporta una simbiosi con ciò che la circonda; ma le leggi fondamentali che governano gli atomi e le molecole sono "date", e nessun processo biologico può retroagire su di esse e modificarle.

I progressi che si sono verificati dai tempi di Henderson in qua hanno svelato altre apparenti coincidenze in cui sembra prevalere un equilibrio alquanto delicato. La più cruciale di queste è forse l'equilibrio nei nuclei atomici fra le due forze che controllano i protoni e i neutroni che li costituiscono: la repulsione elettrica fra i protoni e l'interazione nucleare forte fra protoni e neutroni. Se l'interazione nucleare fosse anche un tantino *più debole*, nessun elemento chimico, eccetto l'idrogeno, sarebbe stabile, né ci sarebbe l'energia nucleare che fornisce potenza alle stelle. Ma se fosse appena appena *più forte* rispetto alle forze elettriche di quello che in realtà è, due protoni si incollerebbero insieme con tanta facilità che l'idrogeno comune non potrebbe esistere e le stelle si evolverebbero in modo del tutto diverso.

Il fatto che l'elettrone pesi così poco rispetto ai nuclei atomici è anch'esso piuttosto importante. È un prerequisito perché molecole come il DNA conservino con precisione le loro strutture caratteristiche. Il principio di indeterminazione di Heisenberg comporta una "confusione" [*fuzziness*] inevitabile nella localizzazione di una qualunque particella, indeterminazione che diminuisce con la massa della particella stessa. In una molecola, l'indeterminazione della posizione di un atomo è determinata dalla massa del suo nucleo. Le orbite degli elettroni intorno al nucleo sono molto più grandi del nucleo stesso perché gli elettroni sono più leggeri. È quindi la massa dell'elettrone che determina le misure globali di un atomo e le distanze fra atomo e atomo nelle molecole. Siccome i protoni sono 1836 volte più pesanti degli elettroni, gli atomi possono localizzarsi con tutta precisione rispetto alle distanze con gli atomi loro vicini, e le molecole complesse possono avere forme spaziali ben definite.

Un neutrone è più pesante di un protone dello 0,14 per cento, poco più di un millesimo. Ma questa differenza, per piccola che sia, è importante perché supera la massa totale dell'elettrone. Se gli elettroni non fossero così leggeri, si combinerebbero spontaneamente con i protoni formando neutroni, ed eliminando tutto l'idrogeno. Nel nostro universo solo le pressioni estreme nell'interno di una stella di neutroni permettono che si verichi questo processo.

Un universo "speciale"?

Tutti gli elementi chimici – ferro, carbonio, ossigeno, e così via – di cui siamo fatti sono stati sintetizzati a partire dall'idrogeno e dall'elio primordiali all'interno di stelle che esplosero prima che si formasse il nostro sistema solare. E le catene di reazioni nucleari che trasmutarono gli elementi dipendevano da altri accidenti ancora. La più impressionante di queste coincidenze – l'abbiamo descritta nel capitolo 1 – è quella che scoprì Fred Hoyle: alcune caratteristiche di "sintonizzazione fine" del carbonio e dell'ossigeno, che apparentemente sembrano meri accidenti della fisica nucleare, si rivelano invece cruciali per l'onnipresenza del carbonio nell'universo, e quindi per il corso dell'evoluzione cosmica.[5]

Se Henderson avesse scritto i suoi libri al giorno d'oggi, avrebbe passato in esame il nostro ambiente su una ben più grande scala galattica (o addirittura cosmologica), notando quegli "accidenti" cosmici, oltre che quelli terrestri, dai quali sembrano dipendere la nostra esistenza e la nostra evoluzione. Il nostro ambiente cosmico doveva poter offrire dimensioni e stabilità tali da fornire lo sfondo e il palcoscenico necessari per lo svolgersi di questi eventi. Le speciali proprietà del nucleo del carbonio avrebbero sicuramente impressionato Henderson.

E avrebbe sicuramente notato altre "coincidenze" ancora. Oltre a quelle che riguardano la forza elettrica e l'interazione nucleare, fondamentali perché possano esistere nuclei atomi-

ci stabili, ce ne sono altre che riguardano i neutrini e la radioattività. I neutrini interagiscono debolmente e piuttosto di rado con le altre particelle; per la maggior parte i neutrini che colpiscono la Terra le passano dritto attraverso. Le reazioni nucleari che comportano l'annichilazione di neutrini sono di conseguenza lente e poco efficaci. Tali reazioni, però, sono cruciali nella costruzione degli elementi chimici.

I neutrini controllavano la produzione dell'elio durante il Big Bang. Un nucleo di elio è fatto da due protoni e due neutroni, la sua sintesi si è verificata quando la temperatura è scesa a circa un miliardo di gradi; la quantità di elio che sopravvive da quei tempi dipende da quanti neutroni sopravvissero a quell'epoca. I neutrini tendono a eliminare i neutroni, trasformandoli in protoni via via che l'universo si espande e si raffredda. Quanto più efficiente è questa reazione, tanto meno neutroni possono sopravvivere e, di conseguenza, tanto meno elio. È per una specie di coincidenza che le reazioni in cui sono coinvolti neutrini hanno condotto a una percentuale di elio nell'universo uscito dal Big Bang che si aggira intorno al 25 per cento, invece di essere zero o il 100 per cento.

I neutrini, inoltre, sono importanti per la produzione degli elementi per un'altra ragione ancora. Quando una stella di grande massa esplode sotto forma di supernova, il suo nucleo interno collassa fino a densità immense e genera un'intensa e violenta emissione di neutrini; questi si diffondono verso l'esterno, depositando la loro energia negli strati più superficiali della stella che vengono così scagliati fuori in un'esplosione. Se l'accoppiamento fra neutrini e atomi ordinari fosse molto maggiore, i neutrini rimarrebbero intrappolati nel nucleo; d'altro canto, se l'accoppiamento fosse più debole di quello che in realtà è, i neutrini se ne sfuggirebbero via liberamente. In entrambi i casi, non potrebbero avere alcuna efficacia nell'innescare l'esplosione delle supernove che espellono i materiali della stella restituendoli allo spazio interstellare. L'ossigeno e gli altri elementi forgiati nelle prime stelle dovevano poter venir dispersi per tutto lo spazio, per permettere alle stelle

di seconda generazione come il nostro Sole di procurarsi i materiali fondamentali per i pianeti e per la vita.

La formazione degli elementi dipende dunque, e per due motivi del tutto diversi, dal fatto che le interazioni dei neutrini hanno un'intensità sottoposta a vincoli piuttosto rigidi, a paragone dell'intervallo di valori (molte potenze di 10) in cui, *a priori*, potrebbe trovarsi.

I tratti distintivi del nostro universo su vasta scala – galassie, ammassi, superammassi – si sono evoluti da increspature o fluttuazioni dell'universo primordiale (vedi capitolo 7). Ovviamente, le galassie non si sarebbero potute formare se la densità di materia fosse stata troppo bassa – la gravità non avrebbe mai potuto sovrastare la pressione in un universo che avesse contenuto solo radiazione. Ma anche se ci fosse stata abbastanza materia, occorreva pur sempre anche qualcos'altro: le irregolarità iniziali che servissero da "semi" per le galassie. Col procedere dell'espansione le regioni più dense della media sono rimaste indietro, e hanno finito col condensarsi formando strutture.

L'"altezza" delle increspature formatesi sulla uniformità globale è descritta dal numero Q, un'altra importante costante naturale. Un universo molto più liscio, in cui Q fosse ancora più piccolo di 10^{-5}, rimarrebbe per sempre oscuro e privo di caratteristiche distintive: niente galassie, niente stelle, nulla del genere si sarebbe mai potuto formare. La fabbrica di un universo con un Q molto più grande di 10^{-5} sarebbe altamente irregolare con strutture che si estenderebbero fino alla scala dell'orizzonte (invece che, come nel nostro, essere ristrette all'uno per cento di questa scala). Come abbiamo visto nel capitolo 7, la scena cosmica sarebbe dominata dai buchi neri invece che dalle galassie, e le stelle (se mai riuscissero a formarsi) si muoverebbero in modo tale da interagire troppo frequentemente per poter conservare sistemi planetari stabili.

Sarà interessante completare lo studio dei modelli di universo elaborati al calcolatore che abbiamo descritto nel capitolo 7 con quello di analoghe simulazioni per universi con valori di Q molto diversi fra loro.

La gravità: meno è meglio

In un universo in cui le forze elettriche fra i nuclei fossero anche solo di qualche punto percentuale più intense dell'interazione nucleare forte, la tavola periodica conterrebbe un elemento solo, l'idrogeno, invece di averne circa un centinaio. Nel nostro universo esiste qualcosa che sia altrettanto sensibile all'intensità della gravità?

Se la gravità fosse appena appena diversa non ci sarebbe nessun cambiamento particolarmente drastico. La forza di gravità, tuttavia, è molto più debole delle forze che governano il micromondo per un fattore di circa 10^{36} – 1 seguito da 36 zeri. Rispetto a un numero così enorme dovremmo prendere in considerazione una variazione un po' più consistente. Si immagini, per esempio, un universo in cui questo numero sia stato scorciato di vari zeri. Quanto e quanto drasticamente differirebbe dal nostro?

Un universo grande, stabile e longevo dipende essenzialmente dal fatto che la forza gravitazionale sia estremamente debole. È perché la gravità è così debole che una stella tipica come il Sole ha una massa tanto grande. In un aggregato appena più piccolo, la gravità non può più competere con la pressione, né comprimere la materia fino a farle raggiungere densità e pressioni centrali tali da permettere la fusione nucleare.

Immaginiamo, allora, un universo in cui ci siano dieci zeri di meno nel numero che misura la debolezza della gravità rispetto alle altre forze – "solo" 10^{26} volte più debole (invece che 10^{36}) delle forze microfisiche all'opera in un atomo di idrogeno – ma che la microfisica resti altrimenti immutata. In questo universo gli atomi e le molecole si comporterebbero esattamente come nel nostro, ma non sarebbe più necessario che gli oggetti abbiano una massa così grande perché la gravità possa competere con le altre interazioni. Il numero di atomi richiesto per formare una stella (un reattore a fusione nucleare costruito dalla gravità) dipende da questo numero elevato a 3/2. Nel nostro universo immaginario, dunque, le stelle

avrebbero una massa pari a 10^{-15} volte quella del Sole. La loro vita sarebbe quindi 10^{10} volte più corta. Invece di vivere per 10 miliardi di anni (10^{10} anni, per l'appunto), vivrebbero un annetto e basta.

Tutte le strutture in un universo del genere sarebbero in scala ridotta. Invece di stelle ampiamente disperse, esse si addenserebbero al punto che incontri molto ravvicinati sarebbero assai frequenti. E questo basterebbe a escludere l'esistenza di sistemi planetari stabili, perché le orbite sarebbero disturbate dalle stelle di passaggio – cosa che, per nostra fortuna, è improbabile che succeda nel nostro sistema solare.

Si potrebbero definire i pianeti come oggetti troppo piccoli per diventare stelle, ma abbastanza grandi perché la loro stessa gravità ne influenzi la forma (rendendoli più o meno rotondi) e forse perché possano trattenere un'atmosfera. Le masse dei pianeti verrebbero dunque ridotte di un fattore 10^{15}, come quelle delle stelle. Lasciando pur perdere il problema se questi pianeti lillipuziani potrebbero mantenere o meno orbite stabili, la forza della gravità tarperebbe ogni potenziale evolutivo su di essi.

Sul nostro pianeta la taglia delle creature viventi è limitata dalla gravità. Galileo lo sapeva. Immaginatevi un animale qualunque, ingrandito del doppio. Le sue dimensioni lineari sono scalate di un fattore 2, quindi il suo volume e il suo peso crescono di un fattore 8; ma le sezioni trasversali delle sue zampe aumentano solo quattro volte e sarebbero quindi troppo deboli per sostenerlo. Bisognerebbe riprogettarlo: le creature più grandi hanno bisogno di zampe più grosse rispetto alla loro taglia complessiva; ai giganti servirebbero gambe più grosse dei loro stessi corpi. Una fisica semplice stabilisce dei duri limiti alla taglia degli animali terrestri; per di più, questi limiti dipendono dall'intensità della gravità. Se la gravità fosse 10^{10} volte più forte, la massa limite di un animale (nel senso del numero di atomi che potrebbe contenere) sarebbe minore di 30 milioni circa: non potrebbero esistere animali più grossi degli insetti e, ciò nonostante, avrebbero bisogno di zampe belle grosse per tenersi in piedi.

L'effetto (letteralmente) schiacciante di una gravità forte restringerebbe molto le prospettive dell'evoluzione complessa in questo mondo ipotetico. Ma ancor più severe sarebbero le limitazioni temporali. I processi chimici e metabolici non risulterebbero accelerati. Ma il mini-Sole di questa mini-Terra brucerebbe assai più velocemente ed esaurirebbe la sua energia prima ancora che cominciassero a mettersi in moto le prime tappe dei processi di evoluzione organica.[6]

Le leggi effettive di riduzione di scala non sono semplici; nondimeno le condizioni per lo sviluppo di un'evoluzione complessa sarebbero senza alcun dubbio meno propizie se, a parità di tutte le altre condizioni, la gravità si facesse più forte. Ci sarebbero meno potenze di dieci a separare le scale temporali dell'astrofisica e quelle della microfisica fondamentale che governa le reazioni fisico-chimiche. Le strutture complesse non potrebbero diventare molto grandi senza farsi schiacciare dalla gravità. Anche se la gravità domina sempre su scale sufficientemente grandi, è grazie alla sua estrema debolezza in rapporto ad altre forze che possono esistere sistemi molto grandi e longevi. In un qualunque universo "interessante" deve esistere almeno un numero molto grosso.[7]

Quante dimensioni?

La nostra immaginazione non deve sforzarsi troppo per concepire universi dalla vita corta, o in cui le forze fondamentali agiscano con intensità diverse, o persino con un diverso "zoo" di particelle elementari. Ma è più difficile convincerla a rappresentarci universi in cui lo spazio e il tempo ammettono un numero differente di dimensioni. Il nostro universo è meglio descritto come un universo con 3 + 1 dimensioni; di dimensioni ce ne sono cioè 4, ma una di esse, il tempo, è marcatamente distinta dalle altre tre. Il tempo è speciale in quanto ci sembra di essere trasportati solo in un senso lungo questa dimensione (in avanti); nelle altre tre possiamo muoverci in tutte e due (nord o sud, est o ovest, in alto o in basso). Questa

forma dello spazio-tempo ha speciali caratteristiche matematiche. Per esempio, se un oggetto viene fatto ruotare arbitrariamente, occorrono tre numeri – tanti quante sono le dimensioni spaziali – per specificare che rotazione si esegue: due per orientare la direzione dell'asse di rotazione, e uno per specificare l'angolo di cui l'oggetto ruota intorno all'asse. In uno spazio a due dimensioni serve un numero solo; in quattro ce ne vogliono sei.

Le forze elettriche e la gravità obbediscono a una legge dell'inverso del quadrato *a causa del fatto* che viviamo in un universo con tre dimensioni spaziali. È facile capirlo usando il concetto – dovuto a Faraday – di linea di forza. Un guscio di raggio r che circondi una massa o una carica ha un'area proporzionale a r^2; la forza, dunque, dipende da $1/r^2$ perché con l'aumentare del raggio le linee di forza si diffondono su un'area più grande e il loro effetto è diluito. In uno spazio quadridimensionale l'area di una "sfera" dipenderà da r^3 e la forza seguirà una legge dell'inverso del cubo.

I pianeti non potrebbero rimanere in orbita se la gravità obbedisse a una legge dell'inverso del cubo (o di potenze ancora più alte); se un pianeta rallentasse appena appena, cadrebbe a spirale verso il Sole, invece di spostarsi un pochetto e sistemarsi su un'orbita leggermente più stretta. Fu Paley, il teologo,[8] il primo a notare questa speciale stabilità della legge dell'inverso del quadrato. Il che diede forza ai suoi argomenti sulla divina provvidenza; ma lui non li collegò sistematicamente al numero di dimensioni.

Può darsi che nuove intuizioni finiscano col rivelare che lo spazio-tempo con 3 + 1 dimensioni, come il nostro, è l'unico possibile. Ma attualmente non sembra esserci nulla di assurdo in un universo con qualche dimensione in più. Secondo le teorie delle superstringhe, l'universo ultraprimordiale aveva dieci dimensioni. Le sei in più si sarebbero arrotolate e compattificate invece di espandersi come e insieme alle altre. I teorici non riescono ancora a dirci se questa compattificazione porti di necessità alle nostre 3 + 1 dimensioni. (Se un universo possa avere più di una dimensione *temporale* è un problema assai meno semplice. Di sicuro, si può però dire che servirebbe un linguaggio con molti più tempi del verbo per descrivere cosa potrebbe succedere lì dentro.)

Un insieme di universi?

Le leggi della microfisica sono state impresse nei primissimi momenti dell'espansione cosmica. E lo stesso vale per altre caratteristiche cruciali del nostro universo, per esempio: il numero di barioni che finirono con l'essere disponibili per formare stelle e galassie; la quantità di materia oscura la cui gravità tiene insieme le galassie; il numero Q che misura le deviazioni dall'uniformità totale.

Le leggi fisiche che furono "scritte" nel corso del Big Bang sembra che si applichino in ogni luogo che oggi possiamo osservare. Ma anche se esse fossero immutabili (o quasi), sembrano essere state accomodate in modo piuttosto speciale. Potrebbe anche essere una coincidenza: un tempo la pensavo così. Ma una prospettiva cosmologica più ampia suggerisce un'interpretazione che sembra più che convincente. Potrebbero esistere altri universi – innumerevoli universi – di cui il nostro sarebbe solo un rappresentante. Negli altri le leggi e le costanti potrebbero essere diverse. Ma il nostro non è un universo scelto a caso. Appartiene al poco comune sottoinsieme che permette alla complessità e alla coscienza di evolversi e svilupparsi. Se si è disposti ad accettare questo punto, tutte quelle caratteristiche del nostro universo che, a prima vista, sembrano "progettate", "finemente sintonizzate", non avrebbero più motivo di farci stupire. Nel prossimo capitolo svilupperemo questa linea di pensiero.

NOTE

1. Se la gravità fosse stata leggermente più intensa nel passato, occorrerebbe abbassare le età stimate delle stelle. Una tale ipotesi potrebbe facilitare il problema (vedi capitolo 8) delle stelle che sembrano vecchie quan-

to l'universo. L'idea non è però stata approfondita. Non c'è nessun'altra motivazione per ipotizzare una variazione di G: anzi, questa idea ci costringerebbe ad abbandonare i successi della relatività generale di Einstein. Inoltre, la legge che governasse il modo di cambiare di G dovrebbe essere soggetta a limitazioni piuttosto rigide per non violare nessun'altra osservazione.

2. Ci sarebbero cambiamenti interessanti persino all'interno dello stesso atomo di idrogeno. La radiazione caratteristica dell'idrogeno nella banda delle radiofrequenze ha una lunghezza d'onda di 21 centimetri e dipende dalla massa dell'elettrone, dalla costante di Planck, ecc., in modo diverso da come la sua struttura spettrale nella banda ottica e nell'ultravioletto dipende da quegli stessi parametri. Ma i radioastronomi e gli astronomi ottici ottengono le stesse risposte quando determinano lo spostamento verso il rosso di un oggetto lontano.

3. Un elemento è definito dal suo "numero atomico" nella tavola periodica: è il numero di protoni presenti nel suo nucleo (le cui cariche elettriche positive sono cancellate da un ugual numero di elettroni orbitanti intorno a esso). Ci possono essere varianti dello stesso elemento a seconda di quanti neutroni sono contenuti nel nucleo, varianti dette "isotopi" dell'elemento. Il deuterio (che ha nel nucleo un protone e un neutrone), per esempio, è un isotopo pesante dell'idrogeno (solo un protone). Per una descrizione del reattore di Oklo, si veda l'articolo pubblicato da M. Maurette in *Annual Review of Nuclear Science*, vol. 26 (1976), p. 319.

4. All'epoca in cui Dirac avanzò queste sue congetture, a Cambridge Arthur Eddington, famoso e stimato per i suoi lavori classici e duraturi sulla relatività e la struttura stellare, si era messo a sviluppare un'elaborata teoria fondamentale "numerologica". Questa teoria sosteneva che l'universo era chiuso e finito e che c'erano (asserzione di Eddington rimasta famosa) "15.747.724.136.275.002.577.605.653.961.181.555.468.044.717.914.527.116.709.366.231.425.076.185.631.031.296 protoni nell'universo e un ugual numero di elettroni" (questo numero mostruoso è, in effetti, uguale a $2^{256} \times 136$). Nessuno scienziato vivente crede una cosa simile, e suppongo che ben pochi si siano mai dati la pena di seguire a fondo il ragionamento di Eddington.

5. Fu una cosa particolarmente impressionante che Hoyle *predicesse*, con una precisione dell'uno per cento, la proprietà chiave del nucleo del carbonio, prima che venisse misurata sperimentalmente. Ma l'evidente "sintonizzazione fine" sarebbe ugualmente notevole anche se il nucleo del carbonio fosse già stato studiato prima che qualcuno si fosse messo a indagare le particolari reazioni coinvolte nella sintesi degli elementi chimici. Una predizione torna a credito della persona che la fa; ma la rilevanza di una "coincidenza" scientifica è indipendente dall'ordine con cui i vari pezzi del *puzzle* vengono incastrati fra loro.

6. I calcoli delineati nel testo sono semplificati; altre caratteristiche, quali la temperatura superficiale delle stelle, si comportano in modo più complicato. In un universo lillipuziano con una forte gravità le prospettive per un'evoluzione complessa sarebbero migliori non intorno a una stella

analoga al nostro Sole (che vivrebbe solo per un anno), ma intorno a una stella che fosse appena oltre la soglia dell'accensione nucleare dell'idrogeno. Stelle del genere nel nostro universo possono vivere per 10^{13} anni e irraggiano nell'infrarosso; ma in questo ipotetico universo "accelerato" vivrebbero mille anni e avrebbero superfici piuttosto calde.

7. Personalmente, cominciai a studiare le varie "coincidenze cosmiche" nel corso degli anni Settanta. Per molte di esse, alla fin fine, si riesce a trovare qualche interpretazione fisica piuttosto semplice (come nel caso della cosiddetta coincidenza di Dirac). Ma ce ne sono altre che sembrano avere un significato genuinamente antropico. Parte del più recente interesse verso questi problemi è stato destato da un articolo ("Anthropic Principle and the Physical World") che scrissi nel 1979 insieme col collega Bernard Carr.

8. Ai tempi di Paley non era affatto raro trovare persone di chiesa dotate di un raffinato interesse per questioni scientifiche. Era normale che gli studenti di Cambridge con ambizioni accademiche si dedicassero ad approfondire i loro studi di matematica. L'esame era molto competitivo. Gli studenti che ottenevano i voti più alti in matematica erano detti "*Wranglers*". Quello in cima alla lista si poteva fregiare del titolo di *Senior Wrangler*. Paley fu *Senior Wrangler* nel 1764: doveva essere molto bravo nel calcolare orbite e altre conseguenze delle leggi di Newton – sicuramente più degli studenti di oggi la cui preparazione verte su argomenti più recenti. Paley studiò anche greco e latino oltre alla teologia. I *vicarages* (parrocchie) di campagna erano un confortevole rifugio per gli accademici che, se si sposavano, non potevano rimanere nei *colleges* di Oxford o Cambridge. Thomas Bayes, un pioniere della statistica, fu anch'egli uomo di chiesa; e John Michell (abbiamo parlato di lui e delle sue speculazioni settecentesche sui buchi neri nel capitolo 5) fu *vicar* della parrocchia di Thornhill, nello Yorkshire.

15

IL RAGIONAMENTO ANTROPICO (CON E SENZA PRINCIPI)

L'universo sapeva che saremmo venuti.

FREEMAN DYSON

La nostra biosfera basata sul carbonio si è lentamente evoluta su un pianeta che orbita intorno a una stella stabile. Dato questo fatto, seguono piuttosto semplicemente alcune caratteristiche del nostro universo e alcuni vincoli per le leggi fisiche che lo governano. Varie coincidenze molto notevoli che abbiamo sottolineato nel corso di questo libro acquistano una prospettiva diversa, una volta che si riconosca che non ci saremmo evoluti se queste condizioni non fossero state soddisfatte. Ma esse hanno, ritengo, un significato ancor più profondo: ci forniscono indizi di come potrebbe apparire il cosmo su scale ancora più grandi di quelle che oggi non possiamo (e forse non potremo mai) esplorare.

Il nostro universo ha alcune caratteristiche – è longevo, stabile e lontano dall'equilibrio termico, per esempio – che rappresentano dei prerequisiti per la nostra esistenza; per di più, il fatto stesso che da esso noi siamo emersi è, come si è visto, dipeso in modo cruciale da un'apparente "sintonizzazione fine" delle costanti fisiche fondamentali: le intensità delle forze fondamentali, le masse delle particelle elementari, e così via.

Si può reagire in vari modi. Uno è quello che sostanzial-

mente consiste nello scrollare le spalle, e il modo più energico di farlo è di dire che le costanti fisiche devono pur avere un *qualche* valore, cosicché non c'è ragione di stupirsi perché abbiano quel preciso valore lì e non quest'altro. Dennis Sciama fornisce una *reductio ad absurdum* di questo modo di vedere. Supponete di entrare in una stanza; c'è un tavolo enorme, e sul tavolo son disposti in fila un milione di cartoncini. Li voltate e trovate che sul primo c'è scritto 1, sul secondo 2, poi 3, e così via fino a 1.000.000. Pensereste che sono stati disposti sul tavolo in modo casuale, visto che qualsiasi ordinamento ha la stessa probabilità di un altro? Ovviamente no.

E questo giudizio non dipende da ciò che sappiamo della psicologia delle persone, per cui ci devono essere delle ragioni per disporre quei cartoncini in quell'ordine speciale; no, dipende da una base matematica oggettiva che ci permette di dire che quel particolare tipo di ordinamento è un ordinamento speciale. È definibile con una lista molto corta di istruzioni: "comincia con 1, e poi ogni volta aggiungi 1". Per contro, occorrerebbe un programma lungo e complicato per dire a un computer come stampare la maggior parte delle successioni costruibili – anzi, una successione puramente casuale non può essere incapsulata in nessun programma che sia più corto di lei (e questo è per l'appunto ciò che essenzialmente significa "casuale"). Ovviamente, l'ordinamento che le coincidenze cosmiche sottendono non ci salta agli occhi con la chiarezza dell'ordinamento di quei cartoncini. Ma questo esempio smentisce la concezione che vorrebbe metterle da parte dicendo che, quali che siano le configurazioni che troviamo, dovremmo semplicemente accettarle come un evento fortuito, piuttosto che metterci a cercare spiegazioni.

Una reazione più ragionevole di fronte alle coincidenze è quella di invocare un qualche tipo di "effetto di selezione". I pescatori – per usare la vecchia metafora di Eddington – non si stupiscono di non pescare pesci più piccoli delle maglie delle loro reti. Né gli astronomi ottici si stupiscono di osservare oggetti molto caldi – altrimenti, questi non brillerebbero. Analogamente, potrebbe sembrare irrazionale stupirsi che il

nostro universo abbia certe proprietà tali che, se non le avesse, noi non esisteremmo.

Ma anche questo non sembra del tutto sufficiente. Dire che noi non saremmo qui a ragionare se le cose funzionassero altrimenti non spegne la nostra curiosità e la nostra sorpresa per il fatto che l'universo è quello che è. Il filosofo canadese John Leslie ha escogitato un'analogia carina. Supponete di essere di fronte a un plotone di esecuzione. Cinquanta fucili si alzano, sparano, e scoprite che tutti i proiettili vi hanno mancato. Se non l'avessero fatto, non sareste lì a notare la fortunata coincidenza. Ma, rendendovi conto di essere ancora vivi, sareste legittimamente perplessi e ve ne domandereste il perché.

Sembra come minimo degno di nota che le leggi fisiche che governano il nostro universo abbiano permesso l'emergere di così tanta interessante complessità. Specialmente se pensiamo quanto sia facile immaginare universi nati morti, in cui niente si potrebbe evolvere. Se un qualche "essere cosmico" si mettesse a girare le manopole che controllano le varie costanti della fisica e costruisse un intero insieme di universi, chiaramente solo uno di loro sarebbe come il nostro. Non solo: non ci sentiremmo "a casa" nella maggior parte di essi. È una banalità, si dirà. Meno banale è però, e potrebbe forse avere un significato profondo, che solo un ristrettissimo insieme di questi universi ipotetici offrirebbe alla complessità *una qualche* possibilità di emergere.

Questa linea di pensiero viene da lontano; si basa su ciò che spesso viene chiamato "il principio antropico". Nome a mio avviso alquanto disgraziato. I "principi" in cosmologia hanno spesso caratterizzato ipotesi non sostenute da prove, ma senza i quali la materia non poteva progredire.[1] L'uso di espressioni del genere ha spesso ostacolato i cosmologi nel far accettare la loro scienza come una scienza di tipo empirico. Così preferisco l'espressione, meno pretenziosa, "ragionamento antropico".

L'interesse contemporaneo per il ragionamento antropico fu innescato da Brandon Carter, un altro studente di Sciama e

mio compagno di studi a Cambridge. Fu il primo a capire pienamente la struttura interna e il significato dei buchi neri rotanti descritti dalla famosa soluzione di Roy Kerr delle equazioni di Einstein (vedi capitolo 5); e continuò a contribuire con altre idee alla teoria dei buchi neri e poi a quella delle stringhe cosmiche. Nel 1970 Carter preparò un lungo manoscritto in cui si discutevano le "coincidenze" nei valori delle costanti fondamentali, segnalandone di nuove (per esempio, la formazione dei sistemi planetari intorno alle stelle potrebbe richiedere una particolare relazione fra l'intensità della gravità e vari altri numeri ricavati dalla fisica atomica). Non fu mai pubblicato, anche se ne venne stampata, anni dopo, una versione abbreviata. Il manoscritto fu però ampiamente discusso, e Carter stesso è stato un influente partecipante ai dibattiti successivi.

Carter distingueva fra un tipo di ragionamento antropico "debole" e uno "forte". Quello che chiamava "principio antropico *debole*" era essenzialmente un modo di tener conto della selezione dell'osservatore: non dovremmo spinger troppo in là la modestia copernicana, ma dobbiamo accettare che creature come noi non possono vedere l'universo in tutti i punti dello spazio e del tempo, cosicché la nostra prospettiva è in qualche modo destinata a essere speciale. Anche questo "principio debole" permette alcune inferenze interessanti e niente affatto ovvie. Un buon esempio è la dimostrazione di Dicke (che abbiamo incontrato nel capitolo precedente) del fatto che Dirac si sbagliava a interrogarsi su coincidenze relative a due numeri molto grandi, quello che misura il nostro universo osservabile e quello che misura l'intensità della gravità. Dicke sottolineava che noi non osserviamo l'universo in un momento qualsiasi della sua storia: viviamo in un'era in cui alcune stelle, ma non tutte, sono morte. Un minimo di semplice fisica stellare comporta che la "coincidenza di Dirac" risulti automaticamente soddisfatta nel corso di questa era.

Il "principio antropico *forte*" di Carter era ancora più controverso e speculativo: in breve, è l'idea che le leggi fondamentali di un qualsiasi universo debbano di fatto essere tali da

permettere l'esistenza di osservatori. Un'asserzione del genere ha sfumature di tipo teologico; sono pochi quelli che l'hanno presa sul serio. Se ne percepisce un'eco, però, in alcune delle interpretazioni della meccanica quantistica.

La visione "partecipativa"

Niels Bohr sosteneva che nessuno che *non* rimanesse stupito dalla meccanica quantistica poteva dire di averla veramente compresa. I dibattiti filosofici su questa teoria sono più vivi che mai. Il punto di vista più comune, la cosiddetta "interpretazione di Copenhagen", fatta propria da Bohr e dai suoi seguaci, vuole che ogni sistema sia governato da una "funzione d'onda" il cui comportamento è esattamente determinato dalla famosa equazione di Schrödinger, fino a che un osservatore decide di effettuare una certa misurazione. Quest'operazione dà luogo al cosiddetto "collasso della funzione d'onda". L'informazione *complementare* a ciò che viene effettivamente misurato (per esempio, l'esatta velocità di una particella se misuriamo la sua posizione, o viceversa) viene irrimediabilmente perduta.

La teoria dei quanti funziona, è innegabile. La maggior parte dei fisici la applicano con fiducia, e senza starci a pensar su più di tanto. Come ha detto John Polkinghorne, "la meccanica quantistica non è in media più filosofica di quanto lo sia la meccanica dei motori". Ma l'interpretazione di Copenhagen fa sentire a disagio non pochi di noi. Implica un'acuta e apparentemente artificiale separazione fra l'oggetto da misurare e l'osservatore-sperimentatore; per contro, tutto – osservatore-sperimentatore e oggetto dell'osservazione-esperimento – dovrebbe essere soggetto alle leggi quantistiche.

Alcuni hanno esaltato il ruolo dell'osservatore ancor di più, affermando che occorre un'osservazione perché "il mondo venga posto in essere". Gli universi sarebbero "reali" solo se contengono osservatori: lo status di un universo dipenderebbe fondamentalmente dal fatto che possa accogliere un os-

servatore conscio di un qualche tipo (che assomigli o meno agli esseri viventi basati sulla chimica del carbonio). Questa concezione "partecipativa" è stata sposata da John Wheeler:

> Questo sistema di esperienza condivisa che chiamiamo mondo si può vedere come costruito a partire dai fenomeni quantistici elementari, atti elementari della partecipazione dell'osservatore. In altre parole, le domande che i partecipanti pongono – e le risposte che ottengono – per mezzo dei loro strumenti di osservazione, insieme con la comunicazione di ciò che trovano, prendono parte alla creazione di quelle impressioni che chiamiamo il sistema: questo grande sistema globale che a uno sguardo superficiale appare come fatto di spazio e tempo, particelle e campi.

Sembra difficile accettare questo "universo partecipativo". Pare anzi difficile prenderlo sul serio. Che genere di osservatore si deve invocare perché venga a "porre in essere il mondo"? Un topo? Un essere umano? Un fisico con tanto di dottorato? Sono comunque riluttante ad assumere atteggiamenti troppo sprezzanti, perché uno come Wheeler si è guadagnato il diritto di essere ascoltato.

Negli anni Trenta, all'inizio della sua carriera, John collaborò con Niels Bohr alla teoria della fissione nucleare. Richard Feynman fu uno dei suoi primi studenti di dottorato (si era laureato nel 1942) e, da allora in poi, Wheeler è stato l'ispiratore di intere generazioni successive di fisici. Negli anni Cinquanta esplorò che cosa potesse implicare l'indeterminazione quantistica sulla natura dello spazio e del tempo. Inventò il concetto di "spuma spazio-temporale", l'idea che, a livello della scala di Planck, lo spazio e il tempo stessi, e persino la dimensionalità del mondo, fluttuino casualmente. Ha introdotto i "geoni", entità ipotetiche che si comportano come particelle, ma non sono fatte da altro che spazio incurvato. Le audaci congetture di Wheeler prefiguravano le attuali idee sulla cosmologia caotica e sui *wormhole* all'epoca del tempo di Planck. Inventò il termine *buco nero* e fu il principale ispi-

ratore della rinascita della ricerca americana nel campo della relatività negli anni Sessanta. La sua attenzione è tuttora concentrata sulle frontiere concettuali della cosmologia, le *flammantia moenia mundi*, le "infuocate mura dell'universo", come ama lucrezianamente chiamarle.

I paradossi della meccanica quantistica e la natura della coscienza sono certo misteri fra i più profondi. Mi colpisce molto che sia John Wheeler sia Roger Penrose, i teorici dello spazio e del tempo più originali e influenti attualmente viventi, abbiano entrambi, nei loro ultimi anni, sostenuto l'eterodossa tesi che questi misteri siano in qualche modo collegati.

Checché si pensi della concezione di Wheeler della meccanica quantistica, essa sposta la prospettiva delle argomentazioni antropiche rendendole meno antropocentriche. Invece di chiederci quali siano le condizioni necessarie per la *nostra* evoluzione, possiamo domandarci che cosa distingua un universo nato morto da uno "conoscibile", nel senso che permette a un qualche tipo di entità conscia, ovvero "osservatore", di evolversi nel suo seno.

Non si deve essere troppo antropomorfi o troppo restrittivi nell'individuare i requisiti necessari per l'emergere di un osservatore. Forse le stelle non sono assolutamente necessarie, forse neanche gli atomi. La fantascienza ci ha abituati a prendere in considerazione alternative veramente bizzarre. Sembra comunque essenziale che ci siano alcuni scostamenti dall'equilibrio termico. Un universo che collassasse troppo velocemente in un suo Big Crunch, per esempio, non potrebbe mai diventare conoscibile nel corso della sua breve esistenza. Anche una forza simile alla gravità potrebbe essere essenziale perché possano emergere delle strutture (come abbiamo detto nel capitolo 7); ma dovrebbe essere debole e lenta, come nel nostro universo.

Un altro approccio alla meccanica quantistica è quello dell'interpretazione dei "molti mondi", proposta da Hugh Everett negli anni Cinquanta. L'idea fondamentale era stata presagita in uno dei classici della fantascienza, *Star Maker* di Olaf Stapledon:

> Ogni volta che una creatura doveva affrontare vari possibili modi di agire, li sceglieva tutti, creando così molte [...] distinte storie del cosmo. Poiché in ogni sequenza evolutiva del cosmo c'erano molte creature e ciascuna di esse si trovava costantemente di fronte a molte strade possibili, e le combinazioni di quelle strade erano innumerevoli, un'infinità di universi diversi si esfoliava in ogni momento di ogni sequenza temporale.

L'approccio dei molti mondi vede il nostro intero universo come un unico sistema quantistico. Ha un richiamo speciale per i cosmologi, cui l'immagine dell'interpretazione di Copenhagen non piace, ed è anzi per loro decisamente insoddisfacente, dato che non ci può essere un osservatore esterno al sistema quando il "sistema" in questione è l'universo intero. Una variante aggiornata, dovuta a David Deutsch, sostituisce all'idea di diramazione degli universi un insieme infinito di universi, che si evolvono parallelamente e dispiegano una varietà sempre maggiore col passare del tempo.

La selezione antropica degli universi

Sembra che le costanti fisiche abbiano dei valori fissati in tutto il nostro universo. Ma forse, in altri, potrebbero assumere valori differenti. La prima volta che Brandon Carter e io sentimmo parlare di speculazioni del genere risale ai primi anni Sessanta, durante alcune conferenze che Charles Pantin, un professore di biologia, teneva allora a Cambridge. Pantin sosteneva che

> le proprietà dell'universo materiale sono adatte in modo unico per l'evoluzione delle creature viventi. Se potessimo sapere che il nostro universo è solo uno fra un numero indefinito di altri in cui le proprietà possono variare, potremmo forse invocare una soluzione analoga al principio della selezione naturale: solo in certi universi, fra cui il nostro, ci sono condizioni

> adatte per l'esistenza della vita; e a meno che tali condizioni non siano soddisfatte, non ci saranno osservatori per poter annotare il fatto.

Se non ci fosse nulla oltre al nostro universo, le sue proprietà sembrerebbero in effetti ben finemente regolate, persino provvidenzialmente bene. Ma supponiamo che si possa dar corpo alla congettura di Pantin, supponiamo cioè che altri universi esistano davvero. Se le costanti fisiche assumessero valori diversi in ciascuno di essi, non ci sarebbe da stupirsi che alcuni universi permettano l'esistenza di creature come noi. E ovviamente noi ci troveremmo nel seno di un membro di questo sottoinsieme speciale. Se andate in un negozio di abbigliamento che offre una scelta enorme, non vi stupirete se trovate il vestito che vi va proprio a pennello.

Gli scienziati, in genere, sono molto ossequiosi del "rasoio di Occam", il famoso principio di Guglielmo di Occam (XIV secolo) per cui "non sunt multiplicanda entia praeter necessitatem": non bisogna invocare l'esistenza di enti se proprio non è assolutamente necessario. E niente sembra violarlo più drasticamente che questo supporre un'infinità di mondi. E non sembra nemmeno, a un primo esame, molto "scientifico" invocare l'esistenza di regioni che oggi sono inosservabili, e forse lo saranno per sempre. La concezione di un insieme di universi di cui il nostro non sarebbe altro che un membro (e non necessariamente tipico), non è stata ancora messa bene a fuoco scientificamente, *ça va sans dir*. Ma aiuta a spiegare certe caratteristiche fondamentali (e altrimenti misteriose) del nostro universo: perché è tanto grande, perché si espande, perché... Nella più ampia prospettiva di un *multiverso*, gli argomenti antropici acquisiscono un genuino potere esplicativo.

Un Multiverso?

L'interpretazione dei molti mondi della meccanica quantistica offre un approccio al concetto di multiverso. L'idea di

"inflazione eterna" descritta nel capitolo 10, pur se piuttosto speculativa, suggerisce un altro contesto in cui potrebbero esistere gli altri universi.

Le forze fondamentali – gravità, nucleari, elettromagnetica – si sono "congelate" ai loro valori attuali e proprietà caratteristiche quando il nostro universo si è raffreddato. Stesso discorso per le masse delle particelle. Quando l'era inflazionaria terminò, lo spazio stesso (il "vuoto") fu sottoposto a drastici cambiamenti. Come abbiamo visto nel capitolo 10, l'inflazione potrebbe aver portato alla creazione di universi separati – domini separati all'interno di un multiverso – che si raffreddarono in modo differente, finendo così con l'essere governati da differenti leggi.

L'evoluzione complessa si verificherebbe solo in quelle "oasi" in cui le costanti hanno valori propizi. La nostra oasi deve allora avere almeno dieci miliardi di anni luce di diametro perché le leggi fisiche sembrano le stesse da tutte le parti che possiamo osservare. Ma il "deserto" che la circonda potrebbe venire in vista nel futuro remoto quando, che so, saranno passati altri 10^{12} anni da oggi e la luce proveniente dalle frontiere della nostra oasi avrà avuto il tempo di raggiungerci. Questo ritardo, poco ma sicuro, costituisce un impedimento ai controlli empirici, e tuttavia asserzioni di questo genere, anche se certamente non controllabili, altrettanto certamente non sono vane e vuote. Assomigliano alle congetture dei primi esploratori che cercavano di scrutare oltre le frontiere del mondo allora conosciuto, o alle congetture di Barrow e Tipler per cui "l'universo ricollasserà fra 10^{15} anni a partire da oggi".

Gli altri universi potrebbero anche essere completamente disgiunti dal nostro, cosicché non entreranno mai nell'orizzonte anche dei nostri più remoti discendenti. Potremmo far parte di un multiverso infinito ed eterno al cui interno sbocciano nuovi domini, germogliando in nuovi universi i cui orizzonti non si sovrapporranno mai. Ironicamente, sembrerebbe che possa così tornare in vita la concezione dello stato stazionario, applicata però al multiverso, invece che agli universi che lo costituiscono. I nuovi universi potrebbero sbocciare

durante il Big Crunch (se il nostro universo finirà col ricollassare) o persino all'interno dei buchi neri. Alex Vilenkin preferisce immaginare che gli universi si "enucleino" separatamente e spontaneamente, gonfiando poi ciascuno il suo spazio separato.

Ciò che tutti questi punti di vista congetturali e speculativi hanno in comune è la visione del nostro Big Bang come *un* evento all'interno di una struttura più ampia; l'intera storia del nostro universo è solo un episodio del multiverso infinito. Alcuni capitoli precedenti dovrebbero aver dato un'idea di che cosa potrebbero essere e a che cosa potrebbero assomigliare questi altri universi.

Il multiverso potrebbe abbracciare tutti i possibili valori delle costanti fondamentali e quindi universi che seguono cicli vitali di durata assai diversa. Alcuni, come il nostro, potrebbero espandersi per molto più tempo di dieci miliardi di anni. Altri potrebbero essere dei nati morti, o perché ricollassano dopo una breve esistenza, o perché le leggi fisiche che li governano non sono abbastanza ricche da permettere conseguenze complesse. In alcuni di essi potrebbe non esistere la gravità; o la gravità potrebbe essere sopraffatta dall'effetto repulsivo di una costante cosmologica come lambda, così come sarebbe avvenuto nel nostro universo durante la primissima fase inflazionaria. In altri la gravità potrebbe essere così intensa da schiacciare qualsiasi cosa abbastanza grande da potersi evolvere in un organismo complesso. Alcuni potrebbero essere così densi che tutto resterebbe in prossimità dell'equilibrio, con la stessa temperatura in ogni loro punto. Altri ancora potrebbero persino avere un numero di dimensioni diverso dal nostro.

Persino un universo che fosse, come il nostro, longevo e stabile, potrebbe essere costituito solo da particelle inerti di materia oscura, sia perché la sua fisica impedirebbe agli atomi ordinari di esistere, sia perché gli atomi si sarebbero potuti annichilire tutti con un ugual numero di antiatomi. Persino se esistessero i protoni e gli atomi di idrogeno, le interazioni nucleari potrebbero non essere abbastanza forti da riuscire a te-

ner insieme i nuclei degli atomi più pesanti: e allora non ci sarebbe nessuna tavola periodica, nessun processo chimico.

La proposta di Smolin

La selezione naturale di universi "favoriti nella lotta per la vita" sembra roba da fantascienza. Eppure, il cosmologo americano Lee Smolin congettura proprio che nel multiverso possano esistere effetti come la selezione e l'ereditarietà. Smolin suppone che, quando un buco nero collassa, germogli dal suo interno un altro universo, che si crea una sua nuova espansione di spazio e di tempo, disgiunti dai nostri. Gli universi piccoli, in cui c'è troppo poco spazio o troppo poco tempo per formare molti buchi neri, non lascerebbero molti discendenti. E nemmeno lo farebbe, sostiene, un universo grande, ma la cui fisica impedisse alle stelle di terminare come buchi neri.

A questo quadro Smolin aggiunge un nuovo tocco: le leggi fisiche che governano l'universo-figlio dovrebbero differire da quelle del suo genitore, *ma solo di poco*. Poiché il numero dei discendenti di un universo dipende dalle leggi in vigore al suo interno, si verifica una pressione selettiva. Molte generazioni, o molte interazioni, conducono a un'esplosione del numero di universi che generano più discendenti. E questi sarebbero quelli governati da leggi che permettono la formazione del massimo numero di buchi neri.

Il meccanismo che potrebbe "imprimere" [*imprint*] le leggi fondamentali nell'universo che si viene a creare è ovviamente ben al di là di ciò che oggi possiamo intendere. Ma l'idea di Smolin, nonostante si addentri un bel po' nei territori della speculazione pura, ha l'innegabile virtù di fare una predizione falsificabile: se il nostro universo fosse il risultato di una "selezione naturale" di questo genere, dovrebbe avere un'efficienza massimale nel generare nuovi universi: come dire che i buchi neri si dovrebbero formare più facilmente in questo universo che in altri. Predizione questa che può venir

passata agli astronomi, che potrebbero controllarla utilizzando osservazioni e concetti fisici relativamente convenzionali.

Immaginiamo di poter "armeggiare" col nostro universo – modifichiamo un po' la massa dell'elettrone, l'intensità della gravità, e altre simili variabili. Allora, se Smolin avesse ragione, ogni cambiamento, ogni "giro di manopola" rispetto alla disposizione attuale, dovrebbe portare o a un universo più piccolo, o ridurre la propensione delle stelle a concludere la loro esistenza come buchi neri. Così, per controllare la sua congettura dobbiamo sapere, per esempio, quali conseguenze avrebbe un riaggiustamento delle costanti sulla probabilità che una stella pesante finisca col diventare un buco nero, invece che disperdere la maggior parte della sua massa in vita, finendo come nana bianca (al di sotto cioè della massa limite di Chandrasekhar, vedi capitolo 4) o come stella di neutroni. Dobbiamo anche sapere se lo stesso riaggiustamento altererebbe i processi di formazione stellare, facendo forse saltare l'equilibrio fra stelle di grande massa (che possono finire come buchi neri) e stelle di massa più piccola (che terminano l'esistenza come nane bianche).

La formazione stellare è un processo che gli astrofisici dovranno riuscire a intendere meglio se vogliono arrivare a poter elaborare modelli dell'"ecologia" e dei processi di riciclaggio galattici, persino della Via Lattea stessa, o a poter interpretare le immagini di remote galassie appena formatesi che lo Space Telescope ci sta fornendo. Nella Nebulosa di Orione, per esempio, a soli 1500 anni luce da noi, si stanno condensando protostelle in dense nubi di polvere e di gas interstellari. È difficile calcolare dettagliatamente i flussi che portano alla condensazione delle protostelle, ma chiaramente la cosa dipende da complicate interazioni fra la gravità e la pressione (che dipende dalla temperatura del gas); anche i campi magnetici hanno importanza; e così la polvere mescolata al gas, che emette raggi infrarossi, aiuta il raffreddamento delle nuvole e riduce la pressione. Ma come si sono formate le stelle nelle galassie giovani, in un'era cosmica più remota? Non c'erano allora altri elementi chimici che non fossero elio e idro-

geno (e dunque non c'era nulla che potesse costituire la polvere); né c'erano, probabilmente, campi magnetici; e la radiazione cosmica di fondo, che oggi ha una temperatura di 2,7 gradi Kelvin, dovrebbe essere stata più calda e avrebbe impedito alle nubi di raffreddarsi come fanno oggi.

Si tratta di problemi che lasciano tuttora perplessi gli astrofisici, e questa mancanza di comprensione ostacola ogni tentativo di capire come si evolvono le galassie. E ostacola anche ogni controllo dell'ipotesi di Smolin. Possiamo star certi che molti buchi neri si vadano oggi formando nel corso della morte delle stelle o tramite l'accumulazione di enormi masse nei centri delle galassie. Il nostro non è certamente un'universo "sterile", secondo i criteri smoliniani. Ma asserire che sia vicino a una produzione "ottimale" di buchi neri è un altro paio di maniche e su questo, per ora, non possiamo che sospendere il giudizio.

Supponiamo, per esempio, che ci sia un universo ipotetico, simile al nostro salvo per il fatto che la repulsione elettrica all'interno dei nuclei atomici sia un po' più forte. In questa situazione i nuclei non si possono fondere insieme liberando energia e fabbricando gli elementi della tavola periodica. Le stelle non avrebbero una fonte interna di energia e si evolverebbero assai più rapidamente verso il loro stadio finale. Le stelle di massa piccola continuerebbero a diventare nane bianche. Le pesanti, invece, avrebbero una probabilità maggiore di quella che hanno nel nostro universo di diventare buchi neri, perché non c'è alcuna possibilità che l'energia nucleare disperda la loro materia, facendo scendere la loro massa al di sotto del limite di Chandrasekhar, prima che arrivino allo stadio terminale. A prima vista, questo scenario sembrerebbe rappresentare un palese controesempio all'ipotesi di Smolin. Tuttavia, la congettura potrebbe venir salvata se le stelle si formassero in modo così diverso in un mezzo costituito da idrogeno puro che solo poche di esse diventerebbero tanto pesanti da trasformarsi in buchi neri e lasciare quindi discendenti.

Al di là della sua rilevanza per gli altri universi, agli astrofisici piacerebbe poter risolvere questo problema perché le prime stelle del nostro universo in espansione si sarebbero formate in un mezzo fatto solo da idrogeno e elio; e se queste fossero effettivamente state per la maggior parte stelle di massa piccola, sarebbero dei buoni candidati a dar conto della materia oscura (vedi capitolo 6). Chiarire questo punto richiede una migliore comprensione dei processi astronomici "tradizionali" – una comprensione che spero riusciremo a ottenere nel giro di pochi anni – più che l'introduzione di nuove esotiche concezioni.[2]

Wheeler e Guth hanno ipotizzato la possibilità di creare artificialmente piccoli buchi neri tramite meccanismi implosivi, buchi neri che potrebbero essere i semi di nuovi universi. Naturalmente, gli argomenti antropici diventerebbero superflui se vivessimo in un universo-figlio consapevolmente creato. Il reverendo "argomento del progetto" del vecchio William Paley potrebbe in tal caso tornar fuori dal sepolcro.

La valutazione degli argomenti antropici

Che *status* hanno oggi gli argomenti antropici? Quando negli anni Settanta vennero per la prima volta discussi con una certa ampiezza, molti li guardarono con un certo distacco. Era chiaro che argomenti simili non offrivano spiegazioni scientifiche in senso proprio: nel migliore dei casi sembravano un palliativo alla nostra curiosità su fenomeni di cui si cercavano spiegazioni fisiche genuine, ma che ancora non erano state trovate. Il mondo sarebbe, per dirne una, assai diverso se le forze elettriche e nucleari venissero in qualche modo alterate, ma c'è sempre la speranza di ricondurre queste forze a una formula matematica, allo stesso modo in cui James Clerk Maxwell riuscì a collegare le forze elettriche e magnetiche con la velocità della luce. Analogamente, Salam e Weinberg sono riusciti a percorrere un altro passo nella stessa direzione incorporando l'interazione debole basata sui neutrini in uno

schema integrato. Per estensione, una teoria più comprensiva potrebbe finire con l'unificare tutte le forze fondamentali.

Così, invece di dover essere misurate sperimentalmente, le forze e le costanti fisiche potrebbero un giorno essere matematicamente calcolabili, allo stesso modo in cui la circonferenza del cerchio si può calcolare a partire dal diametro, anche se non con la stessa facilità. Dice Weinberg: "Non vorrei certo abbandonare i tentativi di rendere superfluo il principio antropico determinando una base teorica per il valore di tutte le costanti. Vale la pena di provare, e dobbiamo assumere che ce la faremo, perché altrimenti siamo votati in partenza al fallimento". Sarebbe dunque un disastro se i fisici teorici prendessero le idee antropiche troppo sul serio, perché così diminuirebbe la loro motivazione nella ricerca di nuove teorie!

Il fisico Heinz Pagels era decisamente sprezzante:[3]

> I fisici e i cosmologi che fanno appello ai ragionamenti antropici mi sembra che abbandonino gratuitamente il programma – che sin qui ha avuto successo – della scienza fisica tradizionale di comprendere le proprietà quantitative dell'universo sulla base di leggi fisiche universali. Forse esasperazione e frustrazioni [...] hanno tolto loro il meglio di sé. L'influenza del principio antropico sullo sviluppo dei modelli cosmologici è stata del tutto sterile. Non ha spiegato nulla, e ha avuto persino un'influenza perniciosa, come si vede dal fatto che oggi, sulla base di nuove leggi fisiche, si riesce a dar conto dei valori di certe costanti [...] per le quali un tempo venivano invocati ragionamenti antropici [...]. Io sarei per respingere il principio antropico come un inutile elemento di confusione nel repertorio concettuale della scienza.

Qui si va troppo in là nello svilire tutti i ragionamenti antropici. In fin dei conti, la sua forma debole – il renderci conto che la nostra esistenza in quanto osservatori ha di per sé implicazioni su ciò che deve essere l'ambiente cosmico in cui viviamo – comporta poco più che il comune atteggiamento dell'osservatore che mette in conto le limitazioni impostegli dalle sue tecniche di ricerca e dalla sua strumentazione. Dire che il

nostro ambiente cosmico è "ben sintonizzato" per forme di vita come la nostra non è solo una tautologia. Produce una comprensione genuina: la spiegazione di Dicke (vedi capitolo 14) delle pretese "coincidenze di Dirac" ne costituisce un esempio. Non c'è niente di molto controverso nell'affermazione che un altro universo, per esempio uno in cui le costanti fisiche negassero l'esistenza a elementi diversi dall'idrogeno, potrebbe essere mal "regolato" per la vita. Gli universi che restano in prossimità dell'equilibrio termico, che durano per un tempo troppo corto, o (più radicalmente) che hanno solo due dimensioni spaziali, sarebbero sicuramente meno propizi del nostro a ospitare qualsiasi genere di evoluzione complessa.

Portata e limiti di una "teoria finale"

Lo status e la portata degli argomenti antropici, a lungo andare, dipenderanno dal carattere delle leggi fisiche (peraltro ancora del tutto sconosciute) che reggono i livelli più profondi della realtà. Weinberg crede nell'esistenza di una "teoria finale" e spera che un giorno potremo scoprirla. Una tale teoria potrebbe fissare in modo univoco le leggi fondamentali che governano il nostro universo: potrebbero venire tutte ricavate da alcune equazioni basilari.

Se le costanti fisiche potessero veramente venir fissate in modo univoco da una teoria "finale", sarebbe allora un fatto, un semplice fatto che questi numeri universali vadano a cadere in quel ristretto intervallo che permette alla complessità e alla coscienza di vedere la luce. Le potenzialità implicite nelle equazioni fondamentali – tutte le intricate strutture del nostro universo – potrebbero anche continuare a stupirci, ma questo stupore sarebbe parente di quello che devono a volte provare i matematici quando contemplano le loro elaborate costruzioni deduttive che seguono da un pugno di assiomi e postulati apparentemente innocui.

Prendiamo come esempio l'insieme di Mandelbrot. Le istruzioni per disegnare questa figura sorprendente possono

essere scritte in poche righe, ma per quanto l'ingrandiamo, strato dopo strato, si dischiude tutta una varietà di struttura. Chiunque abbia studiato un po' di geometria analitica (quella in cui la x e la y indicano le distanze di un punto del piano dagli assi) vede che l'insieme definito da $x^2 + y^2 < 1$ rappresenta la parte interna di un cerchio il cui raggio ha lunghezza 1; ma ci vorrebbe una vera e propria superintelligenza per visualizzare immediatamente la forma dell'insieme di Mandelbrot solo leggendone la "formula"! Similmente, nascoste nelle pieghe delle succinte equazioni di una teoria finale potrebbero giacere tutte le cose che sono emerse nel nostro universo da quando esso cominciò a raffreddarsi dopo il Big Bang, fino a divenire il mondo a bassa energia in cui oggi abitiamo.

Ma la ricerca di una teoria unica potrebbe anche essere destinata alla sconfitta: le particelle e le forze del nostro universo potrebbero essere intrinsecamente arbitrarie. Il modo con cui una barra di metallo risponde agli sforzi e all'incurvamento è importante per gli ingegneri: esistono tavole dettagliate che forniscono le "costanti elastiche" dei vari materiali. Ma per un fisico la maggior parte delle proprietà dei solidi sono qualità *secondarie*, determinate dalla struttura atomica soggiacente. Allo stesso modo, ciò che oggi chiamiamo le costanti fondamentali – i numeri che sono importanti per i fisici – potrebbero essere *conseguenze secondarie* della "teoria finale", invece di essere manifestazioni dirette del suo livello più riposto e più fondamentale. Il multiverso potrà anche essere governato da una qualche teoria unificata, ma ogni universo potrebbe raffreddarsi in modo da possedere certe caratteristiche "accidentali" che finiscono col produrre leggi diverse (e diverse costanti fisiche) che governano i vari membri dell'insieme.

Potrebbe anche darsi che si finisca con lo scoprire che alcune costanti sono genuinamente universali, mentre altre non lo sono. Forse quelle che governano il micromondo sono univocamente determinate in tutto il multiverso (o almeno in tutti i suoi universi con tre dimensioni spaziali) e rappresentano di conseguenza dei "fatti bruti", ma le costanti importanti per la cosmologia potrebbero differire da un universo all'altro.

Gli universi potrebbero avere valori distinti e caratterizzanti di omega (la costante che fissa la densità e la durata del loro "ciclo vitale" se l'universo deve ricollassare); o di lambda (che misura l'energia latente nello spazio vuoto); o di Q (che misura quanto è liscio un universo, determinando così quanta struttura può emergere al suo interno).

Se alcune costanti fisiche sono arbitrarie, allora gli argomenti antropici possono essere schierati in modo appropriato per dar conto dei valori che assumono effettivamente nel nostro universo: anzi, sarebbe questo il *solo modo* di capire perché non hanno valori che potrebbero essere assai diversi.

Una teoria finale quale che sia è ancora una meta così lontana che non possiamo immaginare quali siano le caratteristiche (se mai ce ne sono) che sono univocamente determinate in tutto il multiverso e quali invece rappresentano accidenti del nostro universo verificatisi nel corso del suo raffreddamento. Non possiamo, dunque, valutare con precisione quanto il nostro universo possa venir spiegato "antropicamente". Tuttavia, proprio come le congetture di Smolin sulla selezione naturale cosmologica degli universi fanno "predizioni" che possono venir confermate o confutate dall'astrofisica tradizionale, così possiamo provare a scandagliare la natura di questa teoria finale ancor prima di conoscerla in tutti i suoi dettagli.

Supponiamo che le costanti fisiche importanti prendano valori differenti in altri universi. I loro valori misurati potrebbero non essere tipici dell'intero multiverso: il nostro universo deve, come si è visto, essere speciale e atipico per permettere la nostra esistenza. Ma non dovrebbe essere *indebitamente* speciale: se capiamo bene questo punto, possiamo provare a indovinare quali costanti potrebbero essere "accidentali" e quali invece sarebbero determinate dalle leggi della "teoria finale" che sarebbero in vigore in tutto il multiverso.[4]

Si consideri, per esempio, la costante cosmologica lambda, che misura una forza repulsiva che accelera l'espansione cosmica. La "teoria finale" ci offrirà qualche ragione profonda perché lambda debba essere esattamente uguale a zero? O il suo valore deve essere considerato "un accidente"? Non lo

sappiamo. Persino quei teorici che sperano che la maggior parte delle costanti sia determinata in modo univoco sono un po' meno ottimisti riguardo alla spiegazione di lambda. Steven Weinberg, per esempio, sospetta che lambda possa essere il solo numero che verrebbe selezionato antropicamente invece di essere fissato da una teoria finale. I vincoli antropici escludono che lambda possa avere valori molto alti perché una repulsione cosmica selvaggia impedirebbe la formazione delle galassie. Valori *negativi* di lambda molto grandi possono anch'essi venir messi da parte, perché l'universo ricollasserebbe dopo un ciclo troppo breve per permettere alle stelle di evolversi.

Nel nostro universo lambda potrebbe anche essere diverso da zero: come abbiamo detto nel capitolo 8, l'età stimata delle stelle può venir riconciliata più facilmente con un tempo di Hubble relativamente breve se l'espansione cosmica andasse accelerando, invece che rallentare. Il che significa che lambda dovrebbe avere un ordine di grandezza paragonabile a quello massimo antropicamente concedibile: in universi dove lambda fosse sostanzialmente più grande, non si formerebbe nessuna galassia. Il nostro universo non sarebbe dunque stato, rispetto a lambda, "sintonizzato" con un'accuratezza maggiore di quanto richieda la nostra presenza.

D'altro canto, se il progredire delle osservazioni dovesse rivelare che lambda *non ha* alcun effetto discernibile, indicando così che dovrebbe essere forse 1000 volte più piccola di ciò che richiederebbero i vincoli antropici, allora il nostro universo sembrerebbe, rispetto a lambda, più speciale di quanto avrebbe bisogno di essere. Si potrebbe sospettare allora che la "teoria finale" abbia imposto a tutto il multiverso un lambda esattamente uguale a zero.

Applicando argomenti simili ad altre costanti, possiamo inferire quali caratteristiche sono univoche e uniformi in ogni dominio del multiverso e quale varietà gli universi possono manifestare. Le costanti microfisiche e le masse delle particelle possono essere libere di variare *tutte quante* nei vari universi? E che dire della gravità? Potrebbe persino darsi – come

congettura Smolin – che sia la selezione naturale, e non il mero accidente a far sì che il nostro universo – la parte, cioè, dello spazio-tempo che possiamo osservare – abbia quei particolari valori delle costanti fisiche che di fatto misuriamo.

Il nostro universo e gli altri

Per la maggior parte gli universi sono probabilmente meno propizi del nostro per l'evoluzione complessa, ma non necessariamente tutti dovrebbero essere così. Non siamo in grado di concepire quali strutture potrebbero emergere nel lontano futuro del nostro universo. Ancor meno, dunque, possiamo immaginare cosa potrebbe succedere in un universo in cui ci fossero altre forze oltre alle quattro che conosciamo o in cui il numero di dimensioni fosse maggiore. Il nostro universo potrebbe essere una specie di "parente povero" di altri ben più ricchi di strutture e potenzialità che vanno al di là delle nostre fantasie.

Tracciando le sue mappe, esplorandolo, usando tutte le tecniche dell'astronomia cominciamo a capire il nostro ambiente cosmico. E in una misura che anche solo un decennio fa sarebbe sembrata stupefacente, cominciamo a vedere le leggi che lo governano, e come si è evoluto da quei primi istanti che l'hanno formato. Ma è ancor più notevole che ci si disvelino indizi di altri universi e che possiamo forse dedurre qualcosa del loro essere. Possiamo inferire fin dove potrebbe spingersi una teoria finale, anche se siamo ancora ben lontani dall'averla raggiunta; anche se dovesse per sempre eludere le nostre capacità intellettuali.

Dopo Einstein, Chandrasekhar ha, come pochi altri, a lungo, profondamente e intensamente, riflettuto sulla natura del nostro universo. E così concludeva una delle sue ultime conferenze:

> Il perseguimento della ricerca scientifica viene spesso paragonato allo scalare montagne: montagne alte, e anche meno alte.

Ma chi di noi può mai sperare, anche nella sua immaginazione, di scalare il monte Everest e arrivare alla sua vetta, là dove il cielo è azzurro e l'aria è immobile? Chi può sperare di poter contemplare da quella aerea quiete l'intera catena dell'Himalaia macchiata del bianco delle nevi che si estende fino all'infinito? Analogamente, nessuno di noi può sperare di raggiungere una simile visione della natura e dell'universo che ci circonda. Ma non c'è nulla di meschino o di vile a restarsene nella valle e attendere che il Sole sorga da dietro il Kinchinjunga.

NOTE

1. E.A. Milne, cosmologo di Oxford, postulava come "principio cosmologico" che l'universo su larga scala (su cui all'epoca non si sapeva pressoché nulla) fosse abbastanza uniforme da rendere applicabili i modelli teorici semplici. Bondi e Gold andarono più in là, basando la loro teoria dello stato stazionario su un cosiddetto "principio cosmologico perfetto": l'universo rimarrebbe lo stesso *in ogni epoca* oltre che in ogni posto. Ci siamo poi rapidamente resi conto che il "principio perfetto" era falso (vedi capitoli 2 e 3). Per contro, il "principio cosmologico" è stato confermato con più accuratezza di quanto Milne avrebbe mai osato sperare, almeno per quella parte di universo compresa nel nostro orizzonte attuale. Il "principio di Mach", di cui si è parlato nel capitolo 12, è stato un concetto più fecondo di molti altri, anche se questa sua fecondità è forse dipesa solo dall'essere stato interpretato in così tanti modi diversi.

2. Prima che l'idea di Smolin (inizialmente proposta in un articolo della rivista *Classical and Quantum Gravity*, vol. 9 (1992), p. 173) possa venire ulteriormente sviluppata, bisognerebbe che due problemi ricevessero una formulazione più chiara. In primo luogo, il processo di selezione favorisce gli universi con un *tasso massimo* di produzione di buchi neri, o la quantità rilevante è invece *il numero totale di buchi prodotti durante la vita di quell'universo*? Il secondo criterio dipenderebbe, più che da qualunque altra cosa, da quanto grande e quanto longevo un universo possa essere. Il secondo punto riguarda il vincolo antropico. Supponiamo che si scopra che sia più facile produrre buchi neri in un universo in cui forme di vita complesse non potrebbero mai evolversi. Per esempio, le stelle potrebbero formare buchi neri più facilmente se non ci fossero fonti di energia nucleare disponibili e non ci fosse nessun elemento stabile diverso dall'idrogeno. Ma in tal caso non ci sarebbe chimica, e forse neanche complessità. Se le cose stessero così, bisognerebbe completamente respingere le idee di Smolin. In tal caso si potrebbe però provare a controllare una predizione modificata: e cioè che il nostro universo produca più buchi neri di qualsiasi altro *in cui le condizioni per l'evoluzione complessa siano ugualmente propizie*.

3. La citazione è tratta dal libro di Heinz Pagels, *Perfect Symmetry*, Michael Joseph, London 1985, p. 359 (tr. it. *Universo simmetrico*, Bollati Boringhieri, Torino 1988).

4. Ciò assomiglia alla linea di ragionamento che è stata utilizzata contro l'ipotesi di Boltzmann che il nostro universo sia una fluttuazione dall'equilibrio (vedi capitolo 13): la nostra esistenza richiede una fluttuazione improbabile, ma l'universo reale è assai più grande e costituisce una fluttuazione immensamente più improbabile di quanto richieda la nostra esistenza.

INDICAZIONI BIBLIOGRAFICHE

J. ADOUZE, G. ISRAEL, a cura di, *Cambridge Atlas of Astronomy*, Cambridge University Press, Cambridge.

J. BARROW, *Theories of Everything*, Oxford University Press, New York (tr. it. *Teorie del tutto*, Adelphi, Milano 1992).

J. BARROW, F. TIPLER, *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford University Press, New York.

M. BEGELMANN, M. REES, *Gravity's Fatal Attraction: Black Holes in the Universe*, Freeman, New York (tr. it. *L'attrazione fatale della gravità*, Zanichelli, Bologna 1997).

P. DAVIES, *About Time*, Viking, New York (tr. it. *I misteri del tempo*, Mondadori, Milano 1997).

A. DRESSLER, *Voyage to the Great Attractor*, Doubleday, New York.

G. ELLIS, *Before the Beginning: Cosmology Exaplained*, Marion Boryars Publishers, London.

M. GELL-MANN, *The Quark and the Jaguar: Adventures in the Simple and the Complex*, Freeman, New York (tr. it. *Il quark e il giaguaro. Avventure nel semplice e nel complesso*, Bollati Boringhieri, Torino 1996).

A. GUTH, *The Inflationary Universe*, Addison Wesley, Reading, Mass.

E.R. HARRISON, *Masks of the Universe*, Bantam, New York (tr. it. *Maschere dell'universo*, Rizzoli, Milano 1989).

S. HAWKING, *A Brief History of Time*, Bantam, New York (tr. it. *Dal Big Bang ai buchi neri*, Rizzoli, Milano 1988).

S. HAWKING, R. PENROSE, *The Nature of Space and Time*, Princeton University Press, Princeton (tr. it. *La natura dello spazio e del tempo*, Sansoni, Firenze 1996).

F. HOYLE, *Home is Where Wind Blows: Chapters from a Cosmologist's Life*, University Science Books, Mill Valley.
M. KAKU, *Hyperspace*, Oxford University Press, Oxford.
J.M. KEYNES, "Newton, the Man", in *Newton Tercentary Celebrations*, Royal Society, Cambridge (tr. it. in appendice a *Politici ed economisti*, Einaudi, Torino 1974).
L. LEDERMAN, D. SCHRAMM, *From Quarks to the Cosmos*, Scientific American/Freeman, New York (tr. it. *Dal quark al Cosmo*, Zanichelli, Bologna 1991).
A. LIGHTMAN, R. BRAWER, *Origins: The Lives and Worlds of Modern Cosmologists*, Harvard University Press, Cambridge, Mass.
A. LINDE, *Particle Physics and Inflationary Cosmology*, Harwood, Reading.
M.S. LONGAIR, *Our Evolving Universe*, Cambridge University Press, Cambridge.
S.P. MARAN, a cura di, *Astronomy and Astrophysics Encyclopaedia*, Van Nostrand, New York.
J. NORTH, *History of Astronomy and Cosmology*, Fontana, London.
I.D. NOVIKOV, *Black Holes in the Universe*, Cambridge University Press, Cambridge.
A. PAIS, *Inward Bound*, Clarendon Press, Oxford.
A. PAIS, *Subtle is the Lord: The Science and Life of Albert Einstein*, Oxford University Press, Oxford (tr. it. *"Sottile è il Signore" ... La scienza e la vita di Albert Einstein*, Bollati Boringhieri, Torino 1991[2]).
J. PEEBLES, *Principles of Physical Cosmology*, Princeton University Press, Princeton .
R. PENROSE, *The Emperor's New Mind*, Oxford University Press, Oxford (tr. it. *La mente nuova dell'imperatore*, Rizzoli, Milano 1992).
M. REES, *Perspectives in Astrophysical Cosmology*, Cambridge University Press, Cambridge.
M. ROWAN-ROBINSON, *Ripples in the Cosmos*, Freeman, New York.
C. SAGAN, *Cosmos*, Random House, New York (tr. it. *Cosmo*, Mondadori, Milano 1981).
F. SHU, *The Physical Universe*, Princeton University Press, Princeton.
J. SILK, *A Short History of the Universe*, Freeman, New York.
G. T'HOOFT, *In Search of the Ultimate Building Blocks*, Cambridge University Press, Cambridge.

K.S. THORNE, *Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*, Norton, New York.
K.C. WALI, *Chandra: a Biography of S. Chandrasekhar*, Chicago University Press, Chicago.
S. WEINBERG, *The First Three Minutes*, Andre Deutsch, London (tr. it. *I primi tre minuti*, Mondadori, Milano 1986[3]).
S. WEINBERG, *Dreams of a Final Theory*, Pantheon Books, New York (tr. it. *Il sogno dell'unità dell'Universo*, Mondadori, Milano 1993).
R.S. WESTFALL, *Never at Rest. A Biografy of Newton*, Cambridge University Press, Cambridge (tr. it. *Newton*, Einaudi, Torino 1989).
J.A. WHEELER, *A Journey into Gravity and Spacetime*, Scientific American/Freeman, New York (tr. it. *Gravità e spazio-tempo*, Zanichelli, Bologna 1993).
F. WILCZEK, B. DEVINE, *Longing for Harmonies*, Norton, New York.
D. WILKINSON, *Universes*, Columbia University Press, New York.

INDICE ANALITICO

SCIENZA E IDEE

1. Edgar Morin, Anne Brigitte Kern, *Terra-Patria*
2. Ian Hacking, *Linguaggio e filosofia*
3. Jacques Derrida, *Spettri di Marx*
4. David Bloor, *La dimensione sociale della conoscenza*
5. Hans-Georg Gadamer, *Dove si nasconde la salute*
6. Lawrence M. Krauss, *Paura della fisica*
7. Louis Althusser, *Sulla psicoanalisi*
8. Tom Wilkie, *La sfida della conoscenza*
9. H.R. Wulff, S. Andur Pedersen, R. Rosenberg, *Filosofia della medicina*
10. Gaston Bachelard, *La formazione dello spirito scientifico*
11. Jean-Pierre Changeux, *Ragione e piacere*
12. Alan Musgrave, *Senso comune, scienza e scetticismo*
13. Walter Vandereycken, Ron van Deth, *Dalle sante ascetiche alle ragazze anoressiche*
14. Franco Prattico, *La tribù di Caino*
15. Imre Lakatos, Paul K. Feyerabend, *Sull'orlo della scienza*
16. Giovanni Reale, *Saggezza antica*
17. Enzo Tiezzi, *Fermare il tempo*
18. Jean Baudrillard, *Il delitto perfetto*
19. Babette E. Babich, *Nietzsche e la scienza*
20. Edward P. Thompson, *Apocalisse e rivoluzione*
21. Alan Cromer, *L'eresia della scienza*
22. Wilhelm Weischedel, *La filosofia dalla scala di servizio*
23. Robert Gilmore, *Alice nel paese dei quanti*
24. Maurice Merleau-Ponty, *La natura*
25. Bruno Forte, *Trinità per atei*
26. Paolo Lombardi, *Il filosofo e la strega*
27. A. Petroni, R. Viale (a cura di), *Individuale e collettivo*
28. Pierre Lévy, *Il virtuale*
29. J. Derrida, B. Stiegler, *Ecografie della televisione*
30. Rob DeSalle, David Lindley, *Come costruire un dinosauro*

31. Ernst Peter Fischer, *Aristotele, Einstein e gli altri*
32. Roger Scruton, *Guida filosofica per tipi intelligenti*
33. Colin Bruce, *Sherlock Holmes e i misteri della scienza*
34. Dario Del Corno, *I narcisi di Colono*
35. Roger Penrose, *Il grande, il piccolo e la mente umana*
36. Gina Kolata, *Cloni*
37. Roger Caillois, *L'occhio di Medusa*
38. Jean-Pierre Vernant, *Tra mito e politica*
39. Sven Ortoli, Nicolas Witkowski, *La vasca di Archimede*
40. Andrea Emo, *Supremazia e maledizione*
41. Giorgio Cosmacini, *Ciarlataneria e medicina*
42. Jean-Michel Barrault, *La terra è rotonda*

Martin Rees
Prima dell'inizio
Traduzione di
Pier Daniele Napolitani

La scienza nasce dalla meraviglia di fronte all'insolito, all'inatteso, al bizzarro. Cosa c'è di più strano del fatto che l'universo esista, con la sua complessa architettura di galassie, stelle, sole e pianeti? Per millenni teologia e filosofia hanno cercato di spiegarci l'origine, il divenire e (eventualmente) la fine del Cosmo. Dopo Copernico e Galileo, Newton ed Einstein, la fisica ha finalmente ricostruito la storia dell'universo come l'evoluzione a partire dalla grande esplosione iniziale, il Big Bang. Siamo così davvero riusciti a penetrare nel mistero della creazione? Martin Rees, "autorità indiscussa nel campo dell'astronomia", come dice di lui Stephen Hawking, ci spiega che il Big Bang da cui avrebbe tratto origine il nostro mondo non è altro che un evento locale in un multiverso di cui ci sfugge la configurazione globale. Rinasce così, sulle basi delle discipline scientifiche più avanzate, l'antica idea della pluralità dei mondi, quella stessa per la quale fu bruciato sul rogo, nel 1600, il filosofo Giordano Bruno. Più la scienza procede nella comprensione della natura, più il nostro stupore è destinato ad aumentare.

Martin Rees, astronomo reale britannico, insegna all'Università di Cambridge ed è un magistrale divulgatore.

SCIENZA
E IDEE

Collana diretta
da Giulio Giorello

ISBN 88-7078-508-4
9 788870 785081

L. 42.000